

**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**MEDICIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA Y SUELO, EN  
UN BANCO DE PROTEÍNA CON LAS ESPECIES *Morus alba* Y  
*Cratylia argentea* EN EL CORREGIMIENTO DE CHIRIQUÍ,  
PROVINCIA DE CHIRIQUÍ.**

**LUIS ALBERTO LÓPEZ. S  
2-715-693**

**DAVID, CHIRIQUÍ  
REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2008**

**MEDICIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA Y SUELO, EN  
UN BANCO DE PROTEÍNA CON LAS ESPECIES *Morus alba* Y  
*Cratylia argentea* EN EL CORREGIMIENTO DE CHIRIQUÍ,  
PROVINCIA DE CHIRIQUÍ**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR EL  
TÍTULO DE INGENIERO EN MANEJO AMBIENTAL**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL O  
PARCIAL DEBE SER OBTENIDA DE LA FACULTAD DE  
CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**APROBADO:**

**PROFA. ING. FELICITA GONZÁLEZ**

\_\_\_\_\_  
**DIRECTORA**

**PROF. ING. ALEXIS SAMUDIO**

\_\_\_\_\_  
**ASESOR**

**PROF. ING. AMÍLCAR BEITÍA**

\_\_\_\_\_  
**ASESOR**

**DAVID, CHIRIQUÍ**

**REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2008**

## AGRADECIMIENTO

A mi Dios todo poderoso y a su hijo Jesús de Nazaret por brindarme todas las facilidades que me ayudaron a obtener la oportunidad de alcanzar este título. Por ser los guías de mi vida, mi esperanza y mi castillo de protección y fortaleza.

A mi gran familia López y Santana, por su apoyo y su respaldo incondicional en todo momento como muestra de su confianza en mí.

A mis padres, Marcelino López y Mirca Edith Santana y a mis seis hermanos por demostrarme su infinito amor y brindarme a través de sus sacrificios la oportunidad de crecer espiritual y profesionalmente.

A mis asesores de tesis: profesores Alexis Samudio y Amílcar Beitía y en especial a la directora Ing. Felicita González por ser los guías de este trabajo de investigación y demostrar en todo momento su interés en colaborar conmigo.

Al Dr. Francisco Mora por su colaboración e interés por ayudar a los que tienen el deseo de superarse.

En general, a mis compañeros de clases, amigos del internado, a los funcionarios de la biblioteca, laboratorio de suelo, cafetería y computo de la Facultad de Ciencias Agropecuarias.

Luis Alberto López Santana

## DEDICATORIA

En primer lugar dedico este trabajo de investigación a mi Dios que está en los cielos, por ser el dador de la sabiduría humana que conduce al entendimiento de sus creaciones aquí en la tierra. En segundo lugar dedico este trabajo a toda mi familia y en especial a mis padres y hermanos por comprender que los logros alcanzados en familia son los mejores y más gratos ante los ojos de Dios.

Luis Alberto López Santana Sánchez Reyes

**MEDICIÓN DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA Y SUELO, EN UN BANCO DE PROTEÍNA CON LAS ESPECIES *Morus alba* Y *Cratylia argentea* EN EL CORREGIMIENTO DE CHIRIQUÍ, PROVINCIA DE CHIRIQUÍ**

López, L. 2008. Medición de carbono en la biomasa aérea y suelo, en un banco de proteína con las especies *Morus alba* y *Cratylia argentea* en el Corregimiento de Chiriquí, Provincia de Chiriquí. Tesis Ing. en Manejo Ambiental. Chiriquí, Panamá. Universidad de Panamá. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 90 p.

**RESUMEN**

La investigación se desarrollo en el Centro de Enseñanza e Investigaciones Agropecuarias de Chiriquí (CEIACHI).

Con la finalidad de cuantificar el carbono almacenado en la biomasa aérea y suelo de un banco de proteína de *Morus alba* y *Cratylia argentea*, se establecieron tres parcelas de muestreo para cada especie, en donde se seleccionaron al azar cinco plantas por parcela de cada especie a las que se les midió el diámetro a cinco centímetros del suelo y altura total. Cada planta se dividió por componente (hojas, ramas, frutos, troncos), pesándose por separado cada componente para determinar el peso fresco. El peso seco se determinó a partir de muestra de 200 gramos de cada componente, secadas al horno a 65 grados centígrados por 72 horas, determinándose el porcentaje de materia seca. El diámetro fue la variable más correlacionada con la biomasa seca de las plantas. El modelo alométrico con mejor ajuste para la especie *Cratylia argentea* fue  $y = -1.686426 + 0.912580*(D_5)$  y para la especie *Morus alba* fue  $y = -1.291586 + 0.571204*(D_5)$ .

La biomasa aérea seca total estimada en *Cratylia* fue de 22.03 TMSha<sup>-1</sup> y 14.54 TMSha<sup>-1</sup> para *Morera*. Se calculó un total de 11.02 TCha<sup>-1</sup> en la biomasa aérea del banco de proteína de *Cratylia* y 7.27 TCha<sup>-1</sup> en el de *Morera*.

Las muestras de suelo se tomaron a una profundidad de 20 centímetros, a las cuales se les realizó un análisis de materia orgánica y densidad aparente.

El contenido de carbono almacenado en el suelo con *Cratylia* correspondió a 54.78 TCha<sup>-1</sup> y 45.27 TCha<sup>-1</sup> en el suelo con *Morera*. El carbono total almacenado en el sistema de banco de proteína con *Cratylia argentea* se estimó en 65.80 TCha<sup>-1</sup> y 52.54 TCha<sup>-1</sup> en el sistema con *Morus alba*.

**PALABRAS CLAVES:** Secuestro de carbono, Fracción de carbono, Estimación de biomasa, Modelo alométrico, Bancos de proteína, Carbono orgánico.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁG.
<b>PÁGINA DE APROBACIÓN.</b>	ii
<b>AGRADECIMIENTO.</b>	iii
<b>DEDICATORIA.</b>	iv
<b>RESUMEN.</b>	v
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO.</b>	vi
<b>ÍNDICE DE CUADROS.</b>	viii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.</b>	ix
<b>ÍNDICE DE ANEXOS.</b>	x
<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	1
1.1. Planteamiento del problema.	2
1.2. Antecedentes.	4
1.3. Justificación.	8
1.4. Objetivos.	11
1.5. Hipótesis.	11
1.6. Alcances y limitaciones del estudio.	12
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA.</b>	13
2.1 Los sistemas silvopastoriles en el mejoramiento del medio ambiente y la productividad ganadera.	13
2.2 Secuestro, inventario y monitoreo de carbono.	15
2.2.1 Componentes de almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles.	16
2.2.2 Estimación del contenido de carbono en la biomasa.	17
2.2.3 Dinámica del carbono orgánico del suelo.	20
2.2.3.1 Factores que controlan el secuestro de carbono en el suelo.	24
2.3 El pago por servicios ambientales.	25
2.4 Características botánicas de las especies forrajeras.	28
2.4.1 <i>Cratylia argentea</i> .	28
2.4.2 <i>Morus alba</i> .	30

<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Características del área de estudio.</b>	<b>32</b>
3.1.1 Definición y localización del área de estudio.	32
3.1.2 Geología y suelos.	32
3.1.3 Zona de vida y vegetación.	33
3.1.4 Clima.	34
<b>3.2 Metodología.</b>	<b>35</b>
3.2.1 Establecimiento de las parcelas de muestreo.	36
3.2.2 Muestreo y determinación de la biomasa seca real en las plantas de <i>Morus alba</i> y <i>Cratylia argentea</i> .	38
3.2.3 Elaboración de ecuaciones alométricas.	40
3.2.4 Estimación de la biomasa seca aérea total del sistema.	41
3.2.5 Muestreo de suelo en los bancos de proteína.	42
3.3 Parámetros evaluados.	42
3.4 Análisis estadísticos.	46
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>	<b>48</b>
4.1 Biomasa seca total (Bt) real en plantas de <i>Cratylia argentea</i> .	48
4.2 Biomasa seca total (Bt) real en plantas de <i>Morus alba</i> .	50
4.3 Ecuaciones alométricas.	52
4.4 Determinación de la biomasa seca total aérea (Bt) estimada en los bancos de proteína.	63
4.5 Determinación del contenido de carbono en la biomasa aérea de los bancos de proteína.	63
4.6 Comparación de las medias por contrastes ortogonales para el componente suelo.	65
4.7 Estimación del carbono orgánico (cos) almacenado en el suelo con las especies <i>Cratylia argentea</i> y <i>Morus alba</i> (TCh <sup>-1</sup> ).	68
4.8 Carbono total almacenado en los sistemas de bancos de proteína.	71
<b>5. CONCLUSIONES.</b>	<b>74</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.</b>	<b>76</b>
<b>7. REFERENCIAS CITADAS.</b>	<b>78</b>
<b>8. ANEXOS.</b>	<b>87</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>CUADRO</b>		<b>PÁG.</b>
<b>I</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES EVALUADAS EN LAS PLANTAS DE <i>Cratylia argentea</i>.</b>	<b>49</b>
<b>II</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES EVALUADAS EN LAS PLANTAS DE <i>Morus alba</i>.</b>	<b>51</b>
<b>III</b>	<b>COMPARACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA SECA ENTRE LAS DOS ESPECIES.</b>	<b>52</b>
<b>IV</b>	<b>ANÁLISIS DE VARIANZA DEL MODELO PARA <i>Morus alba</i>.</b>	<b>55</b>
<b>V</b>	<b>COEFICIENTES DEL MODELO PARA <i>Morus alba</i>.</b>	<b>56</b>
<b>VI</b>	<b>ESTADÍSTICOS DEL MODELO PARA <i>Morus alba</i>.</b>	<b>57</b>
<b>VII</b>	<b>ANÁLISIS DE VARIANZA DEL MODELO PARA CRATYLIA.</b>	<b>59</b>
<b>VIII</b>	<b>COEFICIENTES DEL MODELO PARA <i>Cratylia argentea</i>.</b>	<b>60</b>
<b>IX</b>	<b>ESTADÍSTICOS DEL MODELO PARA <i>Cratylia argentea</i>.</b>	<b>61</b>
<b>X</b>	<b>COMPARACIÓN DE MEDIAS UTILIZANDO CONTRASTES ORTOGONALES.</b>	<b>66</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>		<b>PÁG.</b>
1	ILUSTRACIÓN DE LA ESPECIE <i>Cratylia argentea</i> .	28
2	ILUSTRACIÓN DE LA ESPECIE <i>Morus alba</i> .	30
3	DISTRIBUCIÓN DE LAS PARCELAS TEMPORALES DE MUESTREO EN LA PARCELA 16.1 DEL CEIACHI.	37
4	MEDICIÓN DEL DIÁMETRO A CINCO CENTÍMETROS DEL SUELO.	38
5	SEPARACIÓN Y TOMA DEL PESO FRESCO DE LOS COMPONENTES: HOJAS, RAMAS Y TRONCO EN AMBAS ESPECIES.	39
6	RELACIÓN ENTRE LOS DATOS OBSERVADOS Y LOS PREDICHOS CON EL MODELO AJUSTADO PARA LA BIOMASA SECA TOTAL POR ÁRBOL DE <i>Morus alba</i> .	58
7	RELACIÓN ENTRE LOS DATOS OBSERVADOS Y LOS PREDICHOS CON EL MODELO AJUSTADO PARA LA BIOMASA SECA TOTAL POR ÁRBOL DE <i>Cratylia argentea</i> .	61
8	COMPARACIÓN DEL CARBONO TOTAL CONTENIDO EN LOS COMPONENTES DE ALMACENAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE BANCOS DE PROTEÍNA.	72

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>CUADRO</b>		<b>PÁG.</b>
1	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE MATERIA ORGÁNICA Y DENSIDAD APARENTE EN LAS MUESTRAS DE SUELO.	85
2	DIÁMETROS Y BIOMASA SECA REAL POR COMPONENTE Y TOTAL EN LAS PLANTAS DE CRATYLIA.	85
3	BIOMASA SECA TOTAL REAL VS BIOMASA SECA TOTAL ESTIMADA POR LA ECUACIÓN ALOMÉTRICA EN LAS PLANTAS DE <i>Cratylia argentea</i> .	86
4	DIÁMETROS Y BIOMASA SECA REAL POR COMPONENTE Y TOTAL EN LAS PLANTAS DE MORERA.	86
5	BIOMASA AÉREA TOTAL REAL VS BIOMASA AÉREA TOTAL ESTIMADA POR LA ECUACIÓN ALOMÉTRICA EN LAS PLANTAS DE <i>Morus alba</i> .	87
<b>FIGURA</b>		<b>PÁG</b>
1	TITULACIÓN DE LAS MUESTRAS EN EL ANÁLISIS DE MATERIA ORGÁNICA.	87
2	ESTABLECIMIENTO DE PARCELAS DE MUESTREO.	88
3	SECADO DE LAS MUESTRAS AL HORNO Y TOMA DEL PESO SECO.	88
4	FLUJOGRAMA RESUMEN PARA EL MONITOREO DEL SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES.	89
5	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO DENTRO DE LOS TERRENOS DEL CEIACHI EN LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS.	90

## 1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno del calentamiento global ha sido reconocido como una amenaza mayor para la humanidad, prácticamente por todos los estados del mundo y por los organismos multilaterales (Andrasko, Bouwman y Leernans, IPCC; citados por Acosta, Quednow *et al*, 2001).

Estudios recientes de la manera como procede el calentamiento global, dados a conocer por el Panel Intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC, 2001) en Shanghai, señalan un panorama más preocupante para los próximos 100 años que las proyecciones previas. Las temperaturas medias del globo pudiesen alcanzar incrementos de entre 1.4 y 5.5 grados centígrados en este siglo, superiores a las previsiones de 1 a 3.5 grados centígrados hechas con anterioridad.

El actual cambio climático global se atribuye a la concentración en la atmósfera de los llamados gases invernaderos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  Y  $\text{CH}_4$ ) por arriba de los niveles históricos. Los bosques, los sistemas agroforestales y las áreas de cultivo, juegan un papel preponderante en los procesos biogeoquímicos y por lo tanto en el ciclo global del carbono (Masera *et al*; citado por Acosta, Quednow *et al*, 2001).

Desafortunadamente, a nivel mundial mucho de los ecosistemas de este tipo han sido alterados o destruidos a través del tiempo; tal situación, ha contribuido

también en las emisiones del principal gas de invernadero el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

El secuestro de carbono es una posibilidad de ingresos adicionales para productores rurales, aun cuando mercados y mecanismos que operaran son todavía emergentes. Los sistemas de vegetación (natural, forestales inducidos, y agrícolas) tienen capacidad de capturar y secuestrar carbono. (Acosta, Quednow *et al*, 2001).

La agroforestería, como paradigma tecno-productivo, oferta ventajas comparativas en relación a algunos otros sistemas de uso de la tierra: elevación de réditos globales, producción y productividad biofísica, provisión de argumentos socioeconómicos que releven su versatilidad circunstancial y alternativa a los sistemas tradicionales de agricultura migratoria. (Krishnamurthy y Avila; citados por Callo-Concha y Alegre, 2001)

Se demanda ahora, explorar las factibilidades de los sistemas agroforestales para secuestrar carbono, en un marco amplio, transdisciplinario y de compromiso colectivo.

### **1.1 Planteamiento del problema**

El cambio climático global es uno de los principales problemas que enfrenta el mundo de hoy. Algunas manifestaciones de dicho cambio son un incremento de cerca de medio grado centígrado en la atmósfera desde el siglo pasado (Ciesla, 1996) y cambios en los regímenes hídricos.

La concentración de gases de invernadero —dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano y óxido nitroso, en la atmósfera ha aumentado considerablemente, lo cual fortalece el efecto invernadero, con el consecuente sobrecalentamiento del planeta. El CO<sub>2</sub>, principal gas de efecto invernadero, incrementó su concentración de 280 partes por millón (ppm) en 1750 a 360 ppm en el año 2000. El uso de combustibles fósiles genera en la actualidad del 80 al 85 por ciento del CO<sub>2</sub> emitido (Gómez-Echeverri, citado por Andrade e Ibrahim, 2003).

Documentos recientes, evidencian que la ganadería; principalmente los sistemas de producción bovina extensiva, son una de las fuentes más importantes de la emisión de gases que producen el efecto invernadero asociado al calentamiento global (Arias, 2007). Asimismo, son causa importante de la pérdida de la biodiversidad y de la contaminación del agua.

Algunas estimaciones afirman que la ganadería contribuye en un 18 por ciento al cambio climático, produce el nueve por ciento de las emisiones de dióxido de carbono, el 37 por ciento de las emisiones de gas metano y 65 por ciento de las de óxido nitroso (Steinfeld et al; citado por Arias, 2007).

Ibrahim y Mora-Delgado (2003), consideran que la dinámica del carbono en suelo bajo pasturas va a depender del manejo al que sea sometido; el manejo inadecuado de pasturas, podría constituir una fuente de emisiones de carbono, liberando en un suelo de ocho metros de perfil una cantidad de 13.7 toneladas de carbono por hectárea (TCha-1), en tanto que si el manejo fuera ideal los

niveles de carbono almacenado de estas pasturas podrían incrementarse en 20.3 TCh-1.

## 1.2 Antecedentes

A finales de los años setenta el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y luego la Sociedad Mundial de Meteorólogos (SMM), alertan sobre drásticas variaciones climáticas, las que serían consecuencia de la gradual y creciente acumulación de gases de efecto de invernadero en la atmósfera, provenientes principalmente de la actividad industrial y deforestación masiva. La presencia de estos gases y su permeabilidad diferencial a las radiaciones, redundaría en un calentamiento biosférico acumulativo. (UNEP y GMS, IUCC y PNUMA; citados por Callo-Concha y Alegre, 2001).

Houghton, citado por Acosta, Quednow *et al* (2001); nos indica que la tala de terrenos forestales para convertirlos en terrenos de cultivos y ganadería, ha contribuido también, con el incremento de estos gases hacia la atmósfera; de los 136 Gt de carbono que se estiman fueron emitidas a la atmósfera durante el periodo 1850-1998, el 87 por ciento correspondieron a las áreas forestales y el 13 por ciento de cultivos de pastizales.

Según Cook *et al* y Schimel; citados por Bernardus de Jong (2001); señalan por su parte, que las estimaciones del total de CO<sub>2</sub> emitido a partir de estas reducciones en biomasa y procesos de deforestación varían entre 8 y 44 por ciento del total de emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>.

Los sistemas ganaderos tradicionales han sido culpados de aportar grandes cantidades de metano a la atmósfera, debido al proceso digestivo de los bovinos y otros rumiantes (Ciesla, 1996). El metano, uno de los gases que provoca el efecto invernadero es emitido por la fermentación ruminal y las deposiciones de excretas (Arias, 2007).

El metano procedente de la fermentación entérica (ruminal) en los herbívoros es una consecuencia del proceso digestivo durante el cual los hidratos de carbono se descomponen por la acción de microorganismos, en moléculas simples que se absorben en el torrente sanguíneo. La cantidad de metano ( $\text{CH}_4$ ) liberado depende del tipo, edad y peso del animal, así como de la cantidad y calidad del forraje ingerido (IPCC, 1996).

El tipo de dieta afecta considerablemente la producción de gas metano. En países con pocas limitaciones alimentarias las emisiones de gas son del orden de 35 Kg  $\text{CH}_4$ /año por animal; en comparación con 55 Kg  $\text{CH}_4$ /año por animal en los países en vías de desarrollo. Algunos estudios evidencian que cuando en la dieta de los bovinos bajo pastoreo se dispone de leguminosas, se mejoran los parámetros productivos con una disminución en las producciones de metano (Carmona *et al*; citado por Arias, 2007).

La inclusión de forraje arbóreo en la dieta de los animales, aparentemente por su contenido de taninos, permite reducir hasta un 50 por ciento la producción de gas metano con relación a la dieta tradicional de solo pasto. Este efecto positivo que tiene el balance de dietas con leguminosas y otras especies arbóreas en la

producción de metano, sugiere que los sistemas silvopastoriles; también, pueden ser una alternativa para la disminución de metano en el trópico (Carmona *et al*; citado por Arias, 2007).

El metano procedente del manejo del estiércol obedece a su descomposición en condiciones anaeróbicas. Esas condiciones se presentan por lo general cuando se cría un número elevado de animales en un área confinada (IPCC, 1996).

Por otro lado, Steinfeld *et al*; citado por Arias (2007); destaca que el dióxido de carbono emitido a la atmósfera se libera principalmente cuando las áreas boscosas son convertidas en pastizales o en tierras cultivables para la producción de alimentos; incluyendo los granos para la elaboración de concentrados.

La conversión de bosques y praderas a tierras de cultivo o pastos permanentes ocurre principalmente en los trópicos. La tala de los bosques tropicales supone generalmente el desbroce del sotobosque y la tala de árboles, actividades que van seguidas de la quema de la biomasa in situ o de su aprovechamiento como leña. En este proceso, parte de la biomasa se quema y otra parte permanece en el campo, donde se descompone lentamente (por lo general a lo largo de un período de diez años en los trópicos). Una pequeña parte del material quemado (5-10 por ciento) se convierte en carbón vegetal, que resiste a la descomposición durante más de 100 años, y el resto se libera instantáneamente a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> (IPCC, 1996).



Ciesla (1996), nos aclara que el término “quema de la biomasa” incluye todas las actividades humanas intencionales asociadas con el desmonte, quema de la vegetación de la sabana para estimular la regeneración del pasto para el ganado, quema de leña y de carbón vegetal y consumo de residuos agrícolas.

En total, los bosques contienen una cantidad de carbono de 20 a 100 veces superior por unidad de área que las tierras de cultivo y juegan un papel crítico en la regulación del nivel de carbono atmosférico. Se ha calculado que los bosques mundiales contienen más del 80 por ciento del carbono presente sobre la superficie terrestre y aproximadamente el 40 por ciento de todo el carbono existente en el subsuelo terrestre (suelo, desperdicios y raíces). Esto equivale a casi 1.146 giga toneladas de carbono (GtC). Aproximadamente el 37 por ciento de este carbono se encuentra en los bosques (tropicales) de baja latitud, un 14 por ciento en los bosques (templados) de media latitud, y un 49 por ciento en los bosques de alta latitud (Dixon *et al*; citado por Ciesla, 1996).

La relación de la biomasa seca total con el carbono es de aproximadamente 2:1, el contenido de carbono de un bosque tropical húmedo puede alcanzar hasta tanto como 250 toneladas de carbono por hectárea ( $TCha^{-1}$ ) en la biomasa sobre el suelo. En cambio, el contenido de carbono de los bosques tropicales secos con una espesura abierta y discontinua, generalmente alcanza menos de una media de  $40 TCha^{-1}$  (Brown y Lugo; citado por Ciesla, 1996).

También el suelo forestal contiene carbono, estudios indican que el 84.3 por ciento del carbono total contenido en los bosques de las altas latitudes está

almacenado en el suelo. En el suelo de los bosques de mediana latitud está almacenado el 63 por ciento del carbono y en los bosques de baja latitud el porcentaje es de 50.4 por ciento (Dixon *et al*; citado por Ciesla, 1996).

Los suelos experimentan también pérdidas de carbono después de la conversión, sobre todo cuando la tierra se cultiva. La conversión de praderas en tierras de labranza da origen también a emisiones de CO<sub>2</sub>, principalmente de los suelos (IPCC 1996).

Adicionalmente, la degradación de pasturas contribuye de manera significativa al aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico; ya que, en estos sistemas hay una rápida descomposición del carbono de la materia orgánica y por ende, mayor emisión (Houghton *et al*; citado por Andrade e Ibrahim, 2003).

### **1.3 Justificación**

A partir de la problemática mundial causada por la acumulación de gases con efecto invernadero, ha crecido el interés por reducir su presencia en la atmósfera mediante diversas metodologías. Una de ellas involucra a las comunidades vegetales con base en su capacidad de fijar el CO<sub>2</sub>, vía fotosíntesis, al transformarlo en carbohidratos (Larcher, 1969), haciendo más atractivas aquellas especies con mayor capacidad de asimilación de carbono con base en su crecimiento.

Los gases de invernadero podrían reducirse a través de dos procesos: reducción de emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> o creación y/o mejoramiento de los

sumideros de carbono en la biosfera. La forestería puede contribuir a la mitigación del calentamiento global mediante la conservación, el secuestro y almacenamiento y la sustitución de carbono (Vine et al, IPCC; citado por Andrade e Ibrahim, 2003).

El porcentaje de fijación de carbono es una función de muchas variables, que incluyen: especies de árboles, índices de crecimiento, longevidad, sitio, precipitación anual, duración de la estación de crecimiento, duración del turno de rotación, etc. El índice anual de fijación de carbono es más alto en las plantaciones jóvenes (Schroeder; citado por Ciesla, 1996).

Los sistemas silvopastoriles en explotaciones ganaderas pueden contribuir a mitigar la emisión principalmente de bióxido de carbono a través del “secuestro” del mismo en sus diferentes estratos; árbol, pasto y suelo (Users Network; citado por Arias, 2007).

Para Ciesla (1996), la magnitud de la contribución del almacenamiento de carbono de las plantaciones silvopastoriles dependerá de la escala en que éstas se realicen y del uso final que se hará de la madera.

Los sistemas silvopastoriles si bien no son de uso generalizado cada día se están difundiendo más por los beneficios probados que representan para el productor. Los agricultores y ganaderos se han interesado en el manejo de árboles en pasturas debido a su valor para proveer alimento de alto valor nutritivo especialmente en época seca, y por su valor económico como madera y

fuentes de servicios ambientales como por ejemplo, secuestro de carbono y conservación de la biodiversidad (Acosta, et al. 2001).

Sánchez (1999), nos indica que los bancos de proteínas, además de la acumulación de carbono en el estrato aéreo; también almacenan carbono en sus raíces. Existiendo una mayor productividad primaria neta por tanto mayor acumulación de carbono.

Sin embargo, para Andrade e Ibrahim (2003), la cantidad de investigación realizada en agroforestería es poca en comparación con la de otros usos de la tierra, como bosques y plantaciones forestales, y aún falta conocer mejor el potencial de estos sistemas para secuestrar carbono.

Atendiendo lo antes expuesto se realiza esta investigación, el cual es una contribución al conocimiento de dos especies vegetales promisorias (*Morus alba* y *Cratylia argentea*), al momento de elegir la especie de mejor alternativa en los sistemas de producción agroforestales de banco de proteína que contribuyan más eficientemente al secuestro de carbono. Técnicos y productores tendrán la oportunidad de contar con la información que les permita decidirse desde una perspectiva ambiental la especie que se ajuste a mitigar mejor el problema del calentamiento global desde sus terrenos de producción.

El conocimiento del potencial para el secuestro de carbono de las especies de uso agroforestal permitirían orientar las estrategias nacionales o regionales en la lucha contra el calentamiento global del planeta.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General:

- Cuantificar el contenido de carbono almacenado en el suelo y biomasa aérea total de un banco de proteína con las especies *Morus alba* y *Cratylia argentea*.

### 1.4.2 Objetivos Específicos:

- Elaborar y aplicar el modelo alométrico que más se ajuste a la estimación de la biomasa aérea total de las especies *Cratylia argentea* y *Morus alba*.
- Determinar la cantidad de carbono contenido en la biomasa aérea total del sistema.
- Cuantificar el carbono almacenado en el suelo.
- Calcular las toneladas de carbono total contenido en ambos componentes del sistema.

## 1.5 Hipótesis

### Alternativas

**(Ha):** Las especies leñosas del banco de proteína contribuyen significativamente en el secuestro de carbono

**(Ha):** El suelo como almacén de carbono en el banco de proteína contiene mayor cantidad de carbono en comparación con la biomasa aérea.

## **Nulas**

**(Ho):** Las especies leñosas del banco de proteína no contribuyen significativamente en el secuestro de carbono.

**(Ho):** El suelo como almacén de carbono en el banco de proteína no contiene mayor cantidad de carbono en comparación con la biomasa aérea.

### **1.6 Alcances y limitaciones del estudio**

Considerando la gran capacidad de los sistemas agroforestales en la producción de biomasa y conservación de suelo, tal como lo son los bancos de proteína, principalmente por la característica del hábito de crecimiento de las especies que lo constituyen y su densidad de siembra; se determina ahora cuantitativamente la contribución de estos sistemas en la mitigación del calentamiento global a través del secuestro y almacenamiento de carbono atmosférico dentro de sus componentes (suelo y biomasa aérea). Además, la identificación de especies vegetales con mayor capacidad de secuestrar carbono en estos sistemas es otra incógnita importante que la siguiente investigación nos puede ayudar a seguir despejando.

Al conocer el aporte de estos sistemas en  $TCha^{-1}$  se podrán comparar con los demás usos de la tierra y tomar decisiones más acertadas en un momento dado.

Las toneladas de carbono contenidas en los bancos de proteína, además; de mitigar los efectos negativos del calentamiento global, podrían valorarse económicamente y retribuirse en bonos ambientales como incentivo al productor.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Los sistemas silvopastoriles en el mejoramiento del medio ambiente y la productividad ganadera.

Los sistemas agroforestales con animales denominados “Silvopastoriles”, se refieren a la combinación de árboles o arbustos con pastos y animales, en un arreglo espacial, una rotación o ambos, en los cuales hay interacciones ecológicas y económicas entre los componentes árbol y no árbol del sistema (Arias, 1992).

Los sistemas silvopastoriles en los que se asocian pastos, arbustos y árboles forrajeros, pueden evitar la degradación del suelo, mejorar la gestión de la cuenca hidrográfica y proporcionar un hábitat variado a una amplia variedad de biodiversidad. Estos sistemas bien manejados, permiten mejorar tanto la calidad ambiental como la productividad pecuaria (FAO, citado por Arias, 2007).

En este mismo sentido nos indica el mismo autor que entre los principales beneficios ambientales se pueden citar:

- a) La fijación del carbono a través de los árboles y los arbustos; los cuales funcionan como “sumideros de carbono” porque absorben el dióxido de carbono de la atmósfera, que eleva la temperatura del clima, y lo depositan en el suelo y en el tejido leñoso.

- b) La conservación de la biodiversidad; en donde los sistemas silvopastoriles favorecen la formación de un hábitat rico y variado de una gran variedad de aves silvestres, invertebrados y plantas forestales autóctonas.
- c) Filtración del agua y protección de la cuenca; los pastizales bajo árboles retienen más agua al reducir el escurrimiento de agua y mejorar la calidad y la cantidad de agua de los manantiales, los pozos y los canales.
- d) Retención del suelo; en las zonas montañosas, la variedad de árboles y arbustos con raíces de longitud diversa fija el suelo y contribuye a reducir la erosión y a evitar los deslaves.
- e) Mayor productividad del suelo; los arbustos forrajeros y las leguminosas restituyen nitrógeno al suelo, y las raíces de los árboles reciclan los nutrimentos del interior del suelo, donde no llegan las raíces del pasto. (FAO, citado por Arias, 2007).

La productividad de las explotaciones ganaderas, también puede mejorarse a través de los sistemas silvopastoriles. Una vez consolidados estos sistemas, la carga animal puede ser mayor en comparación que solo los pastizales. Así mismo, el efecto de la sombra de los árboles produce una regulación térmica sobre los animales provocando una mayor ingesta de forraje, especialmente en las horas de mayor intensidad solar. También existen evidencias que el pasto que crece bajo sombra regulada contiene mayor contenido de nitrógeno (Toledo y Torres; citado por Arias, 2007).



## **2.2 Secuestro, inventario y monitoreo de carbono.**

Según Green Facts, citado por González (2007), el secuestro de carbono es la extracción y almacenamiento de carbono de la atmósfera hacia sumideros de carbono a través de un proceso físico o biológico como la fotosíntesis.

Para Cuélllo *et al*; citados por Ávila (2000), la fijación de carbono se genera en el proceso de fotosíntesis realizados por las plantas, que capturan el CO<sub>2</sub> de la atmósfera producen carbohidratos, liberan oxígeno y dejan carbono que se utiliza para formar la biomasa de la planta. En ese sentido, los bosques tropicales, las plantaciones forestales y las prácticas agroforestales, y en general, aquellas actividades que lleven a la ampliación de una cobertura vegetal permanente, pueden cumplir la función de “sumideros de carbono”.

Por otro lado, los inventarios de carbono son definidos por MacDiken, citado por Andrade e Ibrahim (2003), como una fotografía del estado actual de cada componente de carbono (biomasa, hojarasca, suelos, raíces) en términos de cantidad del elemento.

En un proyecto que tenga entre sus objetivos; por ejemplo, la venta del servicio ambiental por captura de carbono, hacer un inventario inicial nos permite conocer el punto de partida de nuestro proyecto. Los cambios que se dan en éstos “almacenes” en el tiempo necesitarán medirse periódicamente, llamamos monitoreo al hecho de repetir nuestras mediciones y cálculos a través del tiempo. (Delgadillo y Quechulpa, 2006).

Siguen indicando los mismos autores que la cuantificación de carbono en proyectos donde se consideran sistemas de uso de la tierra ha sido abordada en algunos casos tomando valores de la literatura y haciendo suposiciones que permiten calcular potenciales de fijación de carbono de los que se desprenden valores que deben ser verificados en campo; mientras que en otros se ha optado por realizar mediciones físicas para obtener dichos valores.

Las metodologías utilizadas al verificar en campo valores estimados o cuando se elige medir en vez de estimar, están basadas en la aplicación de métodos forestales estándar y los principios de inventarios forestales, ciencia del suelo y levantamientos ecológicos para medir y analizar biomasa (Márquez, citado por Delgadillo y Quechulpa, 2006).

La gran variabilidad espacial de los sistemas silvopastoriles hace que los muestreos estratificados sean los más convenientes (MacDiken, citado por Andrade e Ibrahim, 2003). El sistema total debe ser dividido en estratos (vegetación, suelo o topografía), los cuales se pueden definir empleando imágenes satelitales, fotografías aéreas, y mapas de vegetación, suelos o topografía.

### **2.2.1 Componentes de almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles.**

Los sistemas forestales y agroforestales acumulan carbono en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo, hojarasca, sistemas radiculares y

carbono orgánico del suelo (Snowdon, *et al*; citado por Andrade e Ibrahim, 2003).

La biomasa sobre el suelo en sistemas silvopastoriles se divide principalmente en biomasa leñosa y biomasa del estrato herbáceo: pastos, leguminosas, hierbas, estados juveniles y otros (Snowdon, *et al*; citado por Andrade e Ibrahim, 2003).

En general, Andrade e Ibrahim (2003), sostienen que todos los componentes grandes y que cambian sustancialmente durante la vida del proyecto deberían ser medidos; sin embargo, es necesario enfatizar en aquellos que almacenan el carbono con mayor permanencia, como la biomasa leñosa.

### **2.2.2 Estimación del contenido de carbono en la biomasa.**

La estimación del almacenamiento de carbono se realiza a partir de los inventarios de la biomasa del ecosistema, empleando la fracción de carbono, que representa el porcentaje de carbono en la biomasa. Las estimaciones del carbono almacenado en sistemas arbóreos asumen, en su mayoría, un valor de 0,5 (Brown y Lugo, IPCC; citado por Andrade e Ibrahim, 2003).

La fracción de carbono puede variar típicamente entre 0,42 y 0,47 en el fuste de árboles en sistemas silvopastoriles (Andrade 1999, Ruiz 2002, citado por Andrade e Ibrahim, 2003).

**Los métodos más usados para estimar esta biomasa son:**

- a) **Uso de modelos de biomasa por especie:** Se estima la biomasa total aérea por individuo con base en el diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total. Lo más aconsejable es emplear modelos que hayan sido construidos bajo condiciones similares a las encontradas donde se quieran aplicar, principalmente en términos de tamaño de árboles y densidad arbórea. Algunos autores han desarrollado modelos de biomasa para su uso en sistemas silvopastoriles de los trópicos seco y húmedo. En este caso, las medidas necesarias son el dap y la altura total del árbol (MacDiken, citado por Andrade e Ibrahim, 2003).
- b) **Aplicación de modelos generales de biomasa:** Se han desarrollado algunos modelos muy generales como herramienta para estimar el contenido de biomasa aérea en inventarios forestales (Brown, *et al*; citado por Andrade e Ibrahim, 2003). Aunque estos modelos pueden presentar grandes limitaciones, podrían usarse en el caso de no existir modelos específicos para zonas o condiciones particulares. El uso de dichos modelos generales requiere de las mediciones del dap, aunadas en algunos casos a la altura total del árbol y la densidad de la madera.
- c) **Construcción de modelos o tablas de biomasa por especie:** En caso de no encontrar modelos por especie, es posible desarrollarlos (Segura y Kanninen, citado por Andrade e Ibrahim, 2003). Los modelos de biomasa son ecuaciones matemáticas que relacionan la biomasa con dimensiones de

árboles en pie (dap, altura comercial y total, crecimiento diamétrico, etc.) (Ortiz, Brown, Araújo, *et al*; citado por Andrade e Ibrahim, 2003). Estos modelos de biomasa pueden ser construidos mediante un muestreo destructivo, usando un mínimo de 30 árboles bien seleccionados (MacDiken, citado por Andrade e Ibrahim, 2003).

En general, la construcción de modelos de biomasa consiste en la medición de árboles en pie y la posterior corta y cuantificación de su biomasa aérea total. El árbol se divide en componentes: fuste, ramas grandes, ramas pequeñas y hojas. Las ramas pequeñas (diámetro <25 cm) y hojas pueden ser pesadas en fresco y transformadas a valores de biomasa tomando una muestra y secándola en el horno (70 °C hasta peso constante). El fuste y las ramas grandes (diámetro ≥25 cm) se cubican (determinación de su volumen por medio de ecuaciones de Smalian, Huber, etc.) y se transforman a biomasa por medio de su gravedad específica.

**d) Uso de tablas de rendimiento estándar:** Las tablas de rendimiento estándar estiman el volumen de árboles en pie con algunas de sus dimensiones (dap, altura total). Posteriormente, con ayuda de la gravedad específica y el factor de expansión de biomasa (relación entre biomasa total y biomasa de fuste), puede estimarse la biomasa aérea total.

e) **La técnica del árbol promedio:** Esta técnica puede ser una opción más económica que los métodos alométricos. El concepto es que un árbol de tamaño promedio tendrá también una biomasa promedio; para esto, el área basal tiende a ser un buen indicador de la biomasa total. Los árboles seleccionados se cortan y se cuantifica su biomasa, se multiplica el peso del árbol promedio por la densidad de árboles del sistema para obtener un estimado de la biomasa total. Pueden incluirse algunas modificaciones, tales como un muestreo estratificado, el método de la relación de área basal o la utilización de valores de promedio ponderado (MacDiken, citado por Andrade e Ibrahim, 2003). El número de árboles por cortar depende del número de estratos del sistema.

MacDiken, citado por Andrade e Ibrahim (2003), señala que en todas estas situaciones, se debe medir el diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total de la vegetación leñosa (dap >2 cm) en las parcelas temporales o permanentes de muestreo.

### **2.2.3 Dinámica del carbono orgánico del suelo.**

El carbono en el suelo puede estar presente en dos formas: carbono orgánico del Suelo (COS) y carbono inorgánico del suelo (CIS). El COS es el componente principal de la materia orgánica del suelo (MOS), la cual juega un papel importante en la productividad de los suelos tropicales, como reserva de nutrientes (FAO, 2000).

Las existencias de carbono orgánico presente en los suelos naturales representan un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización) (Balesdent *et al*; citado por FAO, 2005). En condiciones aeróbicas del suelo, gran parte del carbono que ingresa al mismo es lábil y solo una pequeña fracción (uno por ciento) del que ingresa (55 Pg/año) se acumula en la fracción húmica estable (0,4 Pg/año).

Las entradas de carbono al suelo provienen de diferentes fuentes como: la hojarasca de las herbáceas, la hojarasca de los árboles y la muerte de las raíces de las diferentes plantas que componen el sistema. Las salidas están determinadas principalmente por la oxidación de la materia orgánica del suelo en forma de CO<sub>2</sub>. La capacidad de los suelos de aportar nutrientes determina en gran medida la productividad primaria neta de las plantas e indirectamente de los animales. En este sentido, el tipo de suelo tiene implicaciones sobre el ciclaje de nutrientes y su capacidad de emitir o secuestrar gases invernadero que quedarán sujetos en la biomasa producida por el componente vegetal del sistema (Botero, 2006).

Veldkamp, citado por Botero, 2006; considera también que el tipo de suelo tiene implicaciones directas sobre la capacidad de retener carbono. Comenta que los andisoles, por ejemplo, tienen gran capacidad de almacenar materia orgánica (CO<sub>2</sub>) debido a los complejos que se forman con los componentes amorfos de la matriz del suelo. El nivel de materia orgánica de los suelos es el resultado de complejos procesos de producción y descomposición y en ellos están

involucrados en gran medida el tipo de suelo sobre el cual se está adicionando la materia orgánica.

El mismo autor resalta que el uso del suelo determina en gran medida la descomposición de la materia orgánica. Así por ejemplo, los suelos bajo cultivos pierden un 40 por ciento del carbono que existía cuando el suelo se encontraba bajo bosque; al contrario, los mismos suelos bajo pasturas pierden solo un 20 por ciento del carbono que existía bajo condiciones de bosque después de 5 años de tumba.

Sin embargo, los cambios en el carbono del suelo encontrados son bastante variables; así Bushbacher, citado por Botero (2006), no encontró cambios en la cantidad de carbono del suelo después de la tumba del bosque, Lugo *et al*; citado por Botero (2006), encontraron que hubo aumentos en la cantidad de carbono del suelo, Putz y Pinard; citado por Botero (2006), encontraron cambios importantes en la cantidad de carbono almacenado en el suelo después del aprovechamiento.

Según Palm *et al*; citado por Callo-Concha, Krishnamurthy, Alegre, 2001; los sistemas agroforestales presentan un porcentaje relativo de 80 a 100 por ciento del carbono en el suelo, entre cero y 20 centímetros en relación a un bosque primario no disturbado.

En los trópicos, el depósito de carbono en el suelo varía entre 60 y 115 TCh<sup>-1</sup> (Kanninen, citado por Zamora, 2006). En sistemas silvopastoriles (SSP) pueden



contener depósitos de carbono similares a los de bosques secundarios. Estos depósitos de carbono son debido al almacenaje directo de carbono a corto-mediano plazo (décadas y hasta siglos) en los árboles de los SSP y a la conservación de la materia orgánica en los suelos, especialmente en suelos ácidos y pobres en nutrientes.

Estudios realizados por Gobbágy y Jackson (2000), mostraron que la cantidad de carbono orgánico (COS) del metro superficial se encuentra significativa y positivamente correlacionada (en términos estadísticos) con el clima y la textura (a más arcilla, más COS). El contenido de COS es mayor bajo climas húmedos, fríos y con texturas finas. La proporción de COS en los primeros 20 centímetros respecto al metro superficial, se correlacionaba positivamente con las cantidades de precipitación y negativamente con la temperatura.

La estructura de la vegetación (pasto, matorrales y bosques) afecta no tanto a las cantidades sino a como se distribuye porcentualmente en profundidad, siendo más uniforme, en general, en los matorrales que en los pastizales y bosques. Del mismo modo, en los climas áridos, semiáridos y tropicales también se distribuye más homogéneamente en profundidad. Las repercusiones de la composición mineral del sistema edáfico en lo concerniente al almacenamiento y persistencia del COS, va ganando en importancia conforme se profundiza en los horizontes del suelo.

Por otro lado, varios factores favorecen la retención del carbono en el suelo y permiten mayores tasas de recambio y tiempos de residencia (Oades, citados

por FAO, 2000). Estos incluyen, distribución por debajo de la superficie del suelo, asimilados con bajo contenido de nutrimentos, materiales ricos en lignina y ceras, inundación, bajas temperaturas, texturas arcillosas, alta saturación de bases, agregación y superficies de cargas variables. Los factores que aceleran el flujo hacia el suelo de asimilados de carbono en las plantas son: hojarasca con concentraciones altas de asimilados, asimilados ricos en nutrimentos, carbohidratos, aireación, altas temperaturas, textura arenosa, acidez y superficies con poca carga.

Es obvio que la magnitud con la cual el suelo puede ser un sumidero de carbono depende del balance entre las tasas de los procesos de adquisición y la tasa de rotura tanto de carbono residente como del carbono adquirido (Parton *et al*; citados por la FAO, 2000). Se sabe muy poco acerca de ambos procesos en los suelos tropicales.

Comúnmente, se emplea el método de Walkley y Black (1938) para determinar el carbono orgánico del suelo. Aunque este método tiene algunas limitaciones, es altamente recomendado cuando no se requiere conocer el contenido total de carbono (MacDiken, citado por Andrade e Ibrahim, 2003).

#### **2.2.3.1 Factores que controlan el secuestro de carbono en el suelo.**

El secuestro de carbono potencial será controlado por un número de factores definidos como la mineralogía y la composición mineral del suelo, que define su

textura, profundidad, densidad aparente y aireación (Ingram y Fernández, citados por FAO, 2000).

Explican también que la magnitud a la que el nivel potencial del carbono en el suelo puede llegar, está controlada por factores limitantes, como la productividad neta primaria (PNP) de las plantas que crecen en el suelo, comunidades naturales o cultivos, incluyendo pastos y otras plantas introducidas, por la distribución de la PNP aérea y subterránea, por los efectos directos del clima en los procesos del suelo, principalmente la temperatura, la cantidad y la distribución de la precipitación, y por los efectos indirectos del clima en PNP.

Los niveles actuales del secuestro de carbono en el suelo serán controlados por factores de reducción, entre los cuales están las pérdidas directas por erosión y las causadas por la labranza (Ingram y Fernandez, citados por FAO, 2000). Las prácticas de manejo de residuos de las cosechas, especialmente si se remueven del sitio, pueden limitar la cantidad de carbono que entra al suelo, mientras que si se disturba la biología de éste, como cuando se efectúan quemas, puede haber efectos grandes y prolongados.

### **2.3 El pago por servicios ambientales.**

La República de Panamá es signataria de una gran cantidad de acuerdos globales y regionales sobre conservación del ambiente, unos 39 en total. Dentro de ese espectro destaca, en cuanto su importancia para los mecanismos de pagos por servicios ambientales, el denominado Protocolo de Kyoto (PK),

surgido con motivo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático durante la Cumbre de la Tierra, realizada en junio de 1992 en la ciudad de Río de Janeiro, Brasil (el PK fue ratificado a partir de marzo de 1994).

La Conferencia de las Partes aprobó este instrumento vinculante para establecer líneas de trabajo para mitigar el efecto invernadero a nivel mundial en diciembre de 1997. El PK comenzó a entrar en vigor a partir de febrero de 2005.

Los pagos por servicios ambientales están surgiendo como un potencial para el manejo sostenible de los recursos naturales y la protección del medio ambiente. La aplicación de este instrumento económico puede contribuir significativamente al desarrollo del medio rural porque puede generar opciones de mercado para los pequeños y medianos agricultores y comunidades indígenas. (Riquelme, 2005).

El pago por servicios ambientales es un mecanismo de compensación económica a través del cual los beneficiarios o usuarios del servicio hacen un pago a los proveedores o custodios del servicio. Los servicios ambientales involucrados pueden ser muy concretos tales como un caudal constante de agua dulce o el aprovisionamiento previsible de leña. En otros casos los servicios ambientales pueden ser algo más abstractos o referirse a un ámbito global: captura del carbono o belleza escénica por ejemplo.

El sector de servicios ambientales a nivel mundial incluye, entre otros, la gestión de suelos y agua, la protección de la biodiversidad, la reducción y prevención de impactos sobre los ecosistemas, y la gestión del cambio climático (ANAM, 2005).

El principio central del PSA consiste en que los proveedores de servicios ambientales se verán compensados por los mismos, mientras que los beneficiarios de los servicios han de pagar por ellos. Este enfoque tiene la ventaja de generar fuentes de ingresos adicionales para los usuarios de tierras con bajos ingresos. En los inicios, este sistema se basaba en el principio “contaminador-pagador” esto significaba que todo aquel que impactara el ambiente con externalidades negativas se le requería pagar de acuerdo a los niveles de contaminación que emitiera o vertiera. (Riquelme, 2005).

Nos sigue aclarando el mismo autor, que aunque los servicios ambientales se consideran de gran valor, no son compensados por los agentes beneficiarios. La experiencia ganada en los países que han dado importantes pasos en la formulación y aplicación de este instrumento, indica que para que los mercados de servicios ambientales surjan y se mantengan estables, es necesario:

- Que se reconozca el valor económico de los servicios ambientales.
- Crear estructuras institucionales específicas que vinculen tanto el sector público y privado, como la sociedad civil.
- Un marco legal adecuado.
- Definir las áreas prioritarias.
- Establecer las modalidades básicas a favorecer (conservación de

bosques, por ejemplo).

- Desarrollar los elementos que caracterizan a estos mercados (servicios ambientales potenciales).

## 2.4 Características botánicas de las especies forrajeras.

### 2.4.1 *Cratylia argentea*



**FIGURA 1. ILUSTRACIÓN DE LA ESPECIE *Cratylia argentea***

**Familia:** Leguminosae

**Subfamilia:** Papilionoideae

**Tribu:** Phaseoleae

**Subtribu:** Diocleinae

**Nombre Común:** Cratylia

*Cratylia argentea*, conocida comúnmente como Cratylia, es originaria de la Amazonia Central de Brasil y de áreas de Perú, Bolivia y del norte de Argentina.

(Pizarro *et al*; citado por Pedro *et al*, 2001). Esta leguminosa se desarrolla como un arbusto que alcanza entre 1.5 y 3.0 metros de altura cuando crece en formaciones vegetales abiertas, pero puede convertirse en liana de tipo voluble cuando está asociadas con plantas más altas. (Sobrinho y Nunes; citado por Pedro *et al*, 2001).

Ramifica desde la base del tallo y se han encontrado hasta 11 ramas en plantas adultas. Las hojas son trifoliadas y tienen consistencia papirácea con abundante pubescencia plateada en el envés. La inflorescencia es unseudoracimo noduloso, con seis a nueve flores por nódulo; las flores tienen tamaños que varían entre 1.5 y 3.0 centímetros con pétalos de color lila. El fruto es una legumbre dehiscente que contiene de cuatro a ocho semillas de forma circular. Estas son de color café claro, pero en ocasiones se encuentra un porcentaje variable de semillas de color café oscuro.

Se adapta bien en elevaciones entre 0 y 900 msnm; las informaciones disponibles indican que tiene crecimiento muy lento por encima de 1200 msnm.

La planta crece bien en suelos bien drenados de buena y moderada fertilidad tipo Inceptisol, y en ecosistemas subhúmedos con cinco a seis meses secos; aunque también crece bien en Ultisoles de baja fertilidad localizados en los ecosistemas de trópicos húmedo y estacional semi-siempre verde.

No crece bien en suelos calcáreos ni en suelos pesados con tendencia a saturarse de humedad. Una de las características más importantes es su

capacidad de rebrote y retención de hojas durante la época seca, lo que esta asociado con el desarrollo de raíces vigorosas que alcanzan hasta dos metros de longitud.

#### **2.4.2 *Morus alba***



**FIGURA 2. ILUSTRACIÓN DE LA ESPECIE *Morus alba***

**Familia: Moraceae**

**Orden: Urticales**

**Género: Morus**

**Nombre Común: Morera**

La Morera (*Morus alba*), es una especie que es nativa de la región oriental de Asia. En estado natural es un árbol de 18 metros de altura y 30 centímetros de diámetro, de ramas delgadas lisas, los brotes de las yemas son pequeños,



puntiagudos de color castaño, su savia es lechosa, las hojas son alternadas inconstante en la forma y grado del lóbulo, algunas son no lobuladas pero a menudo de tres – cinco lóbulos, fuertemente serradas, de 6 – 15 centímetros de longitud y de 5 – 10 centímetros de ancho, de color verde brillante y lisa en su parte superior, y de color verde pálido, más o menos vellosas son las flores, masculinas y femeninas en diferentes árboles, atestadas en racimos de 15 - 25 milímetros de largo.(Moreno *et al*, 2002).

Las frutas pequeñas, numerosas, atestadas en racimos de 10 - 20 milímetros de largo, de color púrpura cuando madura. Se le considera "cosmopolita" por su capacidad de adaptación a diferentes climas y altitudes. Actualmente se le localiza en una gran variedad de ambientes, creciendo bien en diferentes altitudes (desde el nivel de mar hasta 4000 metros de altura) y en zonas secas y húmedas. No tolera suelos de mal drenaje o compactados y tiene altos requerimientos nutrimentales, por lo que su fertilización es permanentemente necesaria. (Moreno *et al*, 2002).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Características del área de estudio.**

##### **3.1.1 Definición y localización del área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias Agropecuarias en los terrenos del Centro de Enseñanza e Investigaciones Agropecuarias de Chiriquí (CEIACHI), situado en el Corregimiento de Chiriquí, Distrito de David, Provincia de Chiriquí, República de Panamá, sobre el margen izquierdo del Río Chiriquí y al Sur de la Vía Panamericana (Figura 5 en anexo). Geográficamente el área de estudio esta ubicado entre los 8° 23' 29" de latitud norte y los 82° 20' 05" de longitud oeste, a una elevación de 35 msnm. (PRESA, 1980).

##### **3.1.2 Geología y suelos**

Según PRESA, (1980), la geología del área consiste de formaciones sedimentarias de tipo volcánico no diferenciado del terciario y de formaciones ígneas extrusivas de tipo máfico como basalto y andesita del oligoceno-mioceno. Estos materiales al meteorizarse han originado los suelos rojos arcillosos de las terrazas altas, los cuales se han desarrollado "*in situ*" y constituyen los suelos más antiguos y degradados de la zona, tienen pocos materiales meteorizables y horizontes bien diferenciados.

En la parte baja del campo ocurren suelos desarrollados sobre planicies fluviales formados por deposiciones de origen más reciente los cuales consisten de material cascajoso sobre los cuales se han formado suelos de textura liviana con horizontes muy poco diferenciados. Estos materiales no consolidados de finales del plioceno o inicios del pleistoceno depositados por el Río Chiriquí que nace en la Cordillera Central y drena en el Océano Pacífico, recorriendo una distancia de aproximadamente 82 Kilómetros.

Los suelos del área de estudio pertenecen a las terrazas de origen fluvial. De acuerdo a PRESA, (1980), los suelos son clasificados dentro del orden Ultisol. Estos suelos se caracterizan por su bajo contenido de bases y la presencia de un horizonte de iluviación de arcilla (argílico). Son suelos ácidos, generalmente bien drenados provienen de materiales basálticos y/o andesíticos muy meteorizados y de depósitos fluviales muy antiguos. Poseen una baja fertilidad natural. Las bases han sido lixiviadas, el contenido de fósforo es muy bajo, y el de Al-intercambiable es de moderado a alto.

### **3.1.3 Zona de vida y vegetación**

Según la clasificación de Holdridge, la zona de vida correspondiente al sitio del estudio es clasificado como Bosque Húmedo Tropical. (Instituto Tommy Guardia, 1978).

La vegetación natural se compone de: Nance (*Byrsonima crassifolia*), Macano (*Diphysa robinoides*), Almácigo (*Bursera simaruba*), Sigua (*Ocotea sp.*), Corotú

(*Enterolobium cyclocarpum*) y Harino (*Andira inermis*).

### **3.1.4 Clima**

De acuerdo a la clasificación climática de Koppen el clima es catalogado como tropical lluvioso (Ami), isotérmico, donde la temperatura media del mes más frío es superior a 18 grados Celsius, con precipitación anual mayor a 2,500 milímetros y con más de un mes seco durante el invierno en el hemisferio norte. (Instituto Tommy Guardia, 1978).

- **Precipitación**

El promedio de precipitación anual obtenida para 23 años de registro en la estación meteorológica de la Facultad de Ciencias Agropecuarias resulto ser de 2,857 milímetros (González, 2007).

La estación lluviosa inicia en Mayo con 375 milímetros de lluvia promedio y el mes más lluvioso es octubre con una precipitación mensual de 461 milímetros, seguidos de septiembre y Junio correspondientemente como los meses más lluviosos. En tanto que para la estación seca que inicia en el mes de diciembre, extendiéndose hasta abril; la precipitación no supera los 100 mm/mes, siendo el mes de enero y febrero los más secos. (Aguilar, 1990).

- **Temperatura**

Los promedios anuales de temperatura máximas, mínimas y medias son 32.0, 22.1 y 27.1 grados Celsius respectivamente. (González, 2007).

La amplitud térmica durante la estación seca fluctúa entre 10.4 y 13.4 grados Celsius siendo variaciones muy marcadas y para la estación lluviosa se mantienen arriba de 8.1 grados Celsius. Estas variaciones considerables de temperatura inciden sobre el comportamiento del ecosistema.

- **Humedad relativa**

La humedad relativa promedio mensual es de 78.7 por ciento, un valor relativamente mediano- alto, siendo más baja para los meses de la estación seca y más alta para los meses de la estación lluviosa, notándose marcadamente su diferencia. (González, 2007).

- **Evaporación**

La evaporación promedio registrada en tanque "A" es de 5.11mm/día, siendo los meses de enero y febrero los que presentan mayor demanda evaporativa; en cambio para la estación lluviosa la demanda evaporativa registra un descenso.

### **3.2 Metodología**

La metodología empleada en esta investigación para cuantificar el carbono retenido es la propuesta por MacDiken, 1997; recomendada para monitorear carbono en los sistemas agroforestales. Esta metodología comprende un conjunto de métodos para evaluar cada componente de los sistemas y puede permitir la comparación entre sitios, sistemas y períodos, lo cual dependerá de la relación costo-beneficio (Figura 4 en anexo).

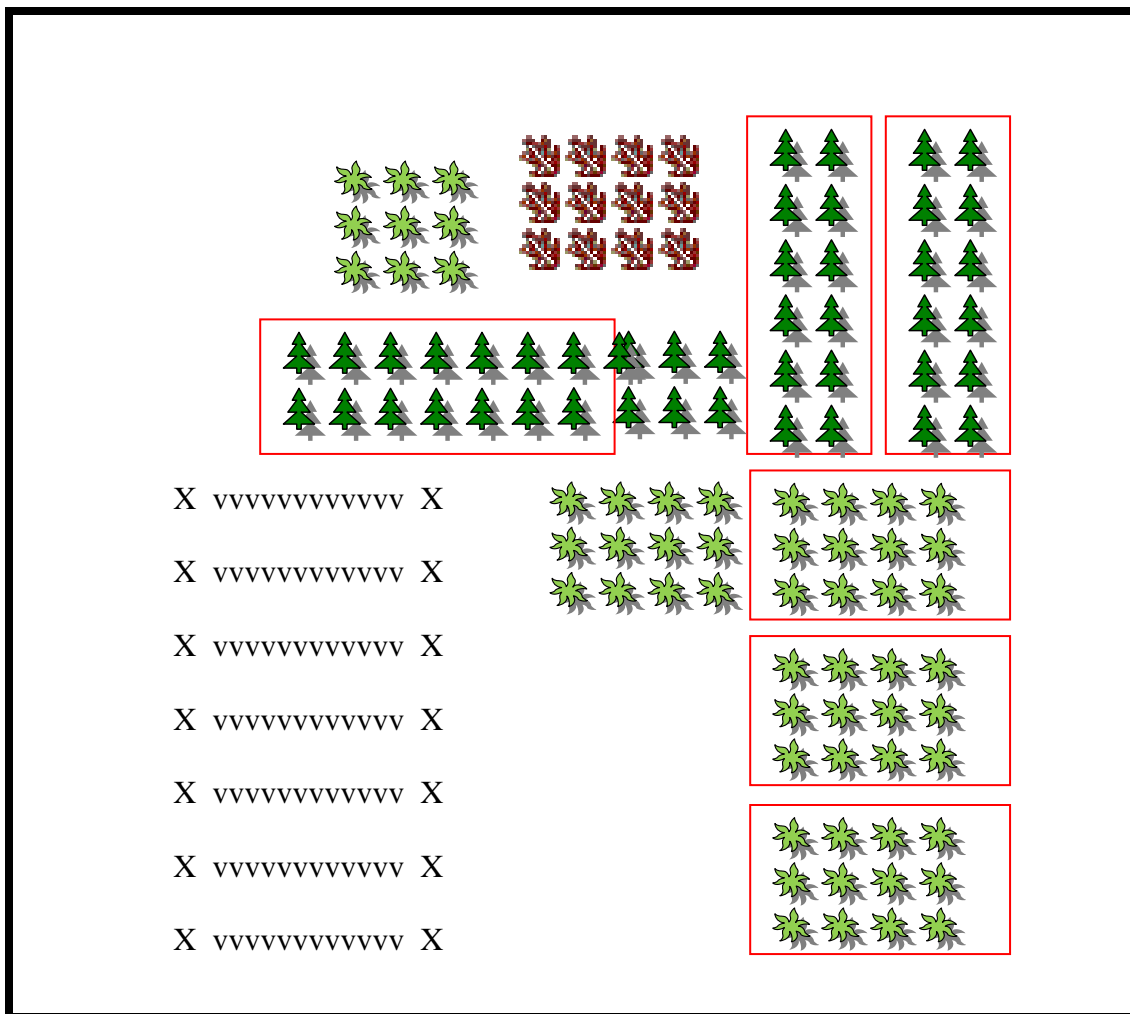
### 3.2.1 Establecimiento de las parcelas de muestreo.

Para Fournier, (1996), las características de las parcelas de muestreo (forma, tamaño y número) constituyen un aspecto clave del inventario.

Para el muestreo de la biomasa aérea en el banco de proteína con la especie *Cratylia argentea* se establecieron tres parcelas temporales rectangulares con dimensiones de dos por seis metros ( $12 \text{ m}^2$ ), ubicadas según la distribución sistemática de las plantas como se muestra en la figura 3; para cada parcela se eligieron al azar cinco plantas para un total de 15 plantas con un rango entre dos a siete centímetros de diámetro, tomado a cinco centímetros sobre el suelo.

En el banco de proteína con la especie *Morus alba* se trabajó con tres parcelas establecidas (Figura 2 en anexo) con dimensiones de tres por cuatro metros ( $12 \text{ m}^2$ ), en donde se muestrearon al azar cinco plantas por parcela para un total de 15 plantas con diámetros entre tres a seis centímetros. El diámetro se tomó a cinco centímetros sobre el suelo.

Igualmente se realizaron los muestreos de suelo en las mismas parcelas para determinar el contenido de carbono en este compartimiento.



**FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN DE LAS PARCELAS TEMPORALES DE MUESTREO EN LA PARCELA 16.1 DEL CEIACHI.**

**Simbología:**



Parcelas de *Cratylia argentea*



Parcelas de *Morus alba*



Banco de *Tithonia diversifolia*

X vvvvvvvvvvv X

X vvvvvvvvvvv X Cultivos en callejones

X vvvvvvvvvvv X

### 3.2.2 Muestreo y determinación de biomasa seca real en las plantas de *Morus alba* y *Cratylia argentea*.

A cada planta en pie se les midió su altura total (h) y el diámetro del tronco a cinco centímetros del suelo ( $d_5$ ) como se aprecia en la figura 4.



**FIGURA 4. MEDICIÓN DEL DIÁMETRO A CINCO CENTÍMETROS DEL SUELO**

Para determinar la cantidad de biomasa aérea seca total real contenida en las 15 plantas de las especies *Cratylia* y *Morera* muestreadas al azar es necesario conocer en primera instancia su contenido de biomasa fresca y posteriormente su porcentaje de materia seca. Para esto, se procedió a cortar y pesar en campo las plantas seleccionadas.

A cada planta seleccionada y por especie se le tomó el peso fresco por componente dividiéndolo en hojas, frutos, ramas y tallos o tronco, como se



aprecia en la figura 5.



**FIGURA 5. SEPARACIÓN Y TOMA DEL PESO FRESCO DE LOS COMPONENTES: HOJAS, RAMAS Y TRONCO EN AMBAS ESPECIES.**

Luego, a cada planta se le tomó una muestra de 200 gramos por componente (hojas, frutos, ramas y troncos). Todas las muestras se secaron al horno a 65 grados centígrados por 72 horas (Figura 3 en anexo), posteriormente con estos datos se determinó la materia seca (%MS) y se calculó la biomasa seca por componente.

El cálculo de la biomasa seca por componente se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Bt\ comp = \%MS \times Pf}$$

Donde:

**Btcomp** = Biomasa seca total por componente (kg)

**% MS** = Materia seca por componente

**Pf** = Peso fresco por componente (kg)

La suma de la biomasa de los componentes equivale a la biomasa seca total (Bt) de cada planta muestreada.

### 3.2.3 Elaboración de ecuaciones alométricas

Se correlacionó la biomasa seca total real de las plantas muestreadas de cada especie con las variables diámetro y altura total de las plantas para conocer la fuerza de relación entre estas; y determinar cual de las dos variables se correlaciona mejor con la biomasa seca real de las plantas. Luego se realizaron los análisis de regresión para calcular los parámetros estimadores de los modelos.

Las ecuaciones alométricas que se probaron tienen la forma:

$$\text{Modelo 1: } y = \alpha + \beta x + \varepsilon$$

$$\text{Modelo 2: } \text{Log}_{10} y = \alpha + \beta \text{Log}_{10} (x)$$

Donde:

**Log<sub>10</sub>** = Logaritmo de base diez

**y** = Biomasa seca total por planta en Kilogramos

**$\alpha$  y  $\beta$**  = Parámetros estimadores (coeficientes de regresión).

**x** = Diámetro en centímetros.

**$\varepsilon$**  = Error

La selección del modelo de mejor ajuste para estimar la biomasa seca total (Bt) de cada especie se determinó estadísticamente mediante el mayor valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de cada modelo.

Según Steel y Torrie (1985), una manera de darse una idea del ajuste de los modelos consiste en conocer el coeficiente de determinación, el cual nos indica qué proporción de la variabilidad entre los valores observados de Y, se explican por la regresión lineal de Y sobre X.

Nos siguen explicando los mismos autores que el  $R^2$  se encuentra entre el intervalo de cero a uno y entre más cercano a uno sea su valor mejor es el ajuste del modelo.

Suárez, Segura y Kanninen (2004), tomaron en cuenta este coeficiente para seleccionar modelos alométricos con mejor ajuste para estimar biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales.

#### **3.2.4 Estimación de la biomasa seca aérea total del sistema.**

La estimación de la biomasa seca total en los bancos de proteína se realizó por medio del modelo alométrico con mejor ajuste, diseñado para cada una de las especies, según la metodología descrita por MacDiken, (1997). Se tomó el diámetro a cinco centímetros del suelo de todas las plantas de ambas especies dentro de las parcelas de muestreo, luego se introdujeron los diámetros a las ecuaciones alométricas para obtener por medio de éstas una estimación de la biomasa seca aérea total de cada planta. Los kilogramos de biomasa seca

obtenidos en las parcelas de muestreo se convirtieron a toneladas y posteriormente se extrapolaron a valores de toneladas de biomasa seca por hectárea.

### **3.2.5 Muestreo de suelo en los bancos de proteína.**

Se tomaron cuatro sub-muestras de suelo por parcela a una profundidad de 20 centímetros mediante un barreno en ambas especies; conformándose una muestra compuesta por parcela; en total se obtuvieron tres muestras de suelo por especie. Adicionalmente se extrajo una muestra compuesta de suelo del área circundante a los bancos de proteína.

Para cuantificar el carbono orgánico del suelo (COS) se determinó la densidad aparente ( $d_a$ ) del suelo en seis muestras, una por cada parcela. Se utilizó el método del cilindro con volumen conocido el cual consistió en introducir un cilindro metálico al suelo y se secó en el horno a 105 grados centígrados, por 72 horas.

### **3.3 Parámetros evaluados.**

#### **Parámetros evaluados en plantas.**

- **Biomasa por componente:** Se refiere a la biomasa por componente (hojas, ramas y tronco principal) en kilogramos, en las dos especies (Cratylia, Morera).

- **Biomasa aérea total (Bt):** Es la sumatoria de la biomasa seca de cada componente en kilogramos.
- **Porcentaje de materia seca (%MS):** Se determinó a través de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ MS} = \text{PS} / \text{PF} * 100$$

Donde:

**PS** = peso seco

**PF**= peso fresco

- **Diámetro a cinco centímetros del suelo (D<sub>5</sub>):** Corresponde al grosor del fuste de las plantas; esta medida se realiza perpendicular a la longitud. (Briscoe, 1990).
- **Altura total (h):** Se refiere a la longitud vertical desde la base de la planta (suelo) hasta la yema apical del tallo principal. (Briscoe, 1990).
- **Contenido de carbono en la biomasa aérea (TCha<sup>-1</sup>):** Se calculó a partir del inventario de la biomasa aérea de las especies *Cratylia argentea* y *Morus alba*. Se determinó por medio de la ecuación:

$$\text{CCB} = \text{B} \times 0.50$$

Donde:

**CCB** = Contenido de carbono en la biomasa en TCha<sup>-1</sup>

**B** = Biomasa vegetal en TMSha<sup>-1</sup>

**0.50** = Factor que corresponde al porcentaje de carbono presente en la biomasa (USDA, 1993).

La razón por la que se multiplica por 0.5 para obtener carbono es porque se considera, que la mitad del peso seco (peso del material sin considerar agua o humedad) es carbono.

### **Parámetros evaluados en suelo.**

- **Densidad aparente en g/cm<sup>3</sup> (da):** Esta propiedad física de los suelos es el peso por unidad de volumen, y permite conocer el peso de cierto volumen de suelo para hacer las estimaciones del carbono orgánico por unidad de área. La masa del suelo secada a 105 grados centígrados por 72 horas (Forsythe, 1974).

$$da = P.s.s / V.i$$

Donde:

**da** = Densidad aparente, (g/cm<sup>3</sup>).

**P.s.s** = Peso del suelo secado a, 105°C (g).

**V.i** = Volumen interno del cilindro de muestreo, (cm<sup>3</sup>).

- **Materia orgánica en porcentaje (%MO):** Se determinó mediante el método de Walkley – Black (1938), el cual se basa en la oxidación de la materia orgánica en presencia de ácido sulfúrico como fuente de calor, además del ácido fosfórico y dicromato de potasio (Figura 1 en anexo). Se utilizó la

fórmula de Jackson (1970), para calcular el porcentaje de materia orgánica presente en las muestras de suelo.

$$\% \text{ M.O} = 10(1-T/S) \times F$$

Donde:

**S** = Valoración en blanco, ml de solución ferrosa.

**T** = Valoración de la muestra, ml de solución ferrosa.

**F** = Factor (1.34 para 0.5g de suelo, 3.35 para 0.2g).

- **Concentración de carbono orgánico (%CO):** Se refiere a la fracción de carbono presente en la materia orgánica (Fassbender, 1980). Se determinó a través de la siguiente relación:  $\%CO = 0.58 \times \%MO$ .
- **Carbono orgánico en suelo (COS) en TCha<sup>-1</sup>:** Se refiere al carbono almacenado en el suelo. Se calculó a partir de la concentración de carbono en la materia orgánica y la densidad aparente del suelo, según MacDicken, 1997. Se aplicó la ecuación :

$$\text{COS} = \%CO * da * P_s$$

Donde:

**COS** = Carbono orgánico del Suelo (TCha<sup>-1</sup>)

**%CO** = Contenido de carbono en suelo (%)

**da** = Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

**P<sub>s</sub>** = Profundidad de muestreo (cm)

### Carbono total almacenado en los sistemas

El carbono total almacenado en los sistemas de bancos de proteína se cálculo por la sumatoria definida por:

$$CTs=CCB+COS$$

Donde:

**CTs**= Carbono total almacenado en el sistema (TCha<sup>-1</sup>)

**CCB**= Carbono almacenado en la biomasa aérea (TCha<sup>-1</sup>)

**COS**= Carbono almacenado en el componente suelo (TCha<sup>-1</sup>)

### 3.4 Análisis estadísticos.

La presente investigación con lleva a la utilización de dos modelos para el análisis estadístico de los datos encontrados, tal como se describen a continuación.

- **Regresión lineal simple**

En estadística la regresión lineal o ajuste lineal es un método matemático que modeliza la relación entre una variable dependiente Y, la variable independiente X y un término aleatorio  $\epsilon$ . Este modelo puede ser expresado como:

$$y = a+b*x+ \epsilon.$$

Donde **a** es la intersección o término "constante", **b** es el parámetro respectivo a la variable independiente y  $\epsilon$  es el error (Steel y Torrie, 1985).



Mediante el análisis de regresión se buscó determinar si existe una relación significativa entre la variable del diámetro de las plantas a cinco centímetros del suelo y la biomasa aérea seca total, y expresar; por medio de una ecuación alométrica, la relación entre ambas variables. Este modelo alométrico permite predecir cuál sería la biomasa seca total en las plantas en función del diámetro.

Las regresiones lineales aplicadas fueron analizadas con el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS).

- **Contrastes para variables edáficas**

Para el análisis estadístico de los datos recolectados en el compartimiento de suelo se utilizó el modelo de comparación contrastes ortogonales, según Steel y Torrie (1985). Un contraste es una combinación lineal entre las medias de tratamientos cuya suma de coeficientes es cero y cuya suma de productos con los demás contrastes también es cero.

$$Q = \sum C_i X_i, \text{ donde: } \sum C_i = 0$$

Con este análisis se buscó conocer si existe diferencia estadísticamente significativa entre las especies *Cratylia argentea* y *Morus alba* en la contribución del proceso de secuestro de carbono en el componente de suelo. Este análisis se realiza a través de la comparación de las medias de las variables del componente suelo entre ambas especies.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Biomasa seca total (Bt) real en plantas de *Cratylia argentea*.

Los valores de las variables evaluadas en las plantas de *Cratylia* seleccionadas para la construcción de los modelos se muestran en el cuadro I. Las plantas presentaron mucha variabilidad en la dimensión de sus diámetros a la altura de cinco centímetros sobre el suelo con valores que fluctuaron entre 2.0 y 6.7 centímetros, con un promedio de 4.27 centímetros. La altura de las plantas registraron rangos entre 2.20 a 5.00 metros, con un promedio de 3.60 metros.

La variabilidad registrada en la altura y en el diámetro de las plantas de *Cratylia argentea* puede atribuirse a la competencia entre plantas producto de la densidad de siembra, por ser bloques compactos existe una mayor competencia en las plantas.

En la biomasa aérea seca de las plantas de *Cratylia* se registraron valores promedios de 350, 170, 1,000 y 680 gramos para los componentes hojas, frutos, ramas y tronco respectivamente. El valor promedio de la biomasa aérea seca total en las plantas de *Cratylia* se estimó en 2,200 gramos. La sumatoria de la biomasa seca total de las 15 plantas seleccionadas originó un total de 33,040 gramos de materia seca.

Xavier *et al*, citados por Argel y Lascano (2001), encontraron rendimiento de 1,073 gramos de biomasa seca total por planta, encontrándose dentro del rango de biomasa seca total obtenidos en este estudio. Sin embargo, Maass, citado por Rodríguez y Guevara (2002), encontró valores inferiores en Colombia con rendimientos promedios de 148 gramos de biomasa seca total por planta, con rangos variables entre 85.0 y 272.0 gramos.

En general, los rendimientos de biomasa seca por planta de *Cratylia argentea* están influenciados por la fertilidad del suelo, la densidad de siembra, la edad a la cual se realiza el primer corte y la edad de la planta. (Argel y Lascano, 2001)

**CUADRO I. CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES EVALUADAS EN LAS PLANTAS DE *Cratylia argentea*. (N = 15 PLANTAS)**

<b>Variable</b>	<b>Rango</b>	<b>Promedio</b>	<b>Total</b>
<b>Diámetro: D<sub>5</sub> (cm)</b>	2.0 – 6.7	4.27	
<b>Altura (m)</b>	2.20 – 5.00	3.60	
<b>Biomasa en hojas (g)</b>	80 - 880	350	5,260
<b>Biomasa en frutos (g)</b>	0.00 - 520	170	2,500
<b>Biomasa en ramas (g)</b>	110 – 3,120	1,000	15,060
<b>Biomasa en tronco (g)</b>	110 – 1,920	680	10,220
<b>Biomasa aérea total (g)</b>	410 – 6,340	2,200	33,040

Fuente: López, 2008.

El mayor aporte a la biomasa seca total aérea lo aportó la biomasa seca de las ramas con un 45.45 por ciento seguido del tronco, hojas y frutos con 30.91, 15.91 y 7.73 por ciento respectivamente. El mayor aporte de las ramas se debe

a la capacidad de rebrote de la planta luego de las podas. Lobo y Acuña, citados por Argel y Lascano (2001), reportaron 13.3 y 14.6 rebrotes por planta durante la época lluviosa.

#### **4.2 Biomasa seca total (Bt) real en plantas de *Morus alba*.**

En esta especie la variable diámetro ( $D_5$ ) registró un rango entre 3.5 a 6.0 centímetros con un promedio de 4.81 centímetros, la altura vario entre 2.08 a 3.60 metros con un promedio de 2.79 metros. La variabilidad en las dimensiones de estas variables se atribuye a la competencia entre las plantas.

En la biomasa aérea seca de las plantas de Morera se registraron valores promedios de 20, 610 y 820 gramos para los componentes hojas, ramas y tronco respectivamente. El valor promedio de la biomasa aérea seca total en las plantas de Morera fue de 1,450 gramos y la sumatoria de la biomasa seca total de las 15 plantas seleccionadas originó un total de 21,810 gramos de biomasa seca, (Cuadro II).

Estudios realizados por Noda *et al* (2007), encontraron valores inferiores en los rendimiento de biomasa seca total en Morera con 134.72 gramos de biomasa seca total por planta. La inferioridad se debe a que el estudio por Noda *et al*, no toman en cuenta los primeros 50 centímetros del tronco. Además, las densidades de siembra y la frecuencia de poda difieren entre los ensayos.

El mayor aporte al peso seco de la biomasa total en las plantas de Morera lo aportó el tronco con un 56 por ciento, seguido por el 42.07 por ciento de las ramas y el 1.38 por ciento restante lo aportaron las hojas (Cuadro II).

**CUADRO II. CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES EVALUADAS EN LAS PLANTAS DE *Morus alba* (N = 15 PLANTAS).**

<b>Variable</b>	<b>Rango</b>	<b>Promedio</b>	<b>Total</b>
<b>Diámetro: D<sub>5</sub> (cm)</b>	3.5 – 6.0	4.81	
<b>Altura (m)</b>	2.08 – 3.60	2.79	
<b>Biomasa en hojas (g)</b>	1 – 50	20	250
<b>Biomasa en ramas (g)</b>	240 – 1,310	610	9,180
<b>Biomasa en tronco (g)</b>	140 – 1,240	820	12,370
<b>Biomasa aérea total (g)</b>	390 – 2,450	1,450	21,810

Fuente: López, 2008.

La diferencia en la producción de biomasa entre las especies se muestra en el cuadro III. La especie *Cratylia argentea* presentó mayor producción de biomasa seca con 11.23 kilogramos de biomasa seca más que la producida por la especie *Morus alba*.

Esta diferencia puede deberse a la mejor adaptabilidad de la *Cratylia* al tipo de suelo y a su baja fertilidad, a la época de muestreo (inicio de la estación lluviosa) y a la propiedad de la especie de conservar sus hojas. La Morera es una especie de altos requerimientos nutrimentales.

Según Pizarro *et al*; citados por Argel y Lascano (2001), la alta retención foliar, particularmente de hojas jóvenes, y la capacidad de rebrote durante la época seca es una de las características más sobresalientes de *C. argentea*. Esta cualidad está asociada al desarrollo de raíces vigorosas de hasta dos metros de longitud que hace la planta tolerante a la sequía aún en condiciones extremas de suelos pobres y ácidos.

### CUADRO III. COMPARACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA SECA ENTRE LAS DOS ESPECIES.

Variable	Biomasa seca en <i>Cratylia</i>	Biomasa seca en <i>Morera</i>	Diferencia
<b>Biomasa total en hojas (Kg)</b>	5.26	0.25	5.01
<b>Biomasa total en ramas (Kg)</b>	15.06	9.18	5.88
<b>Biomasa total en tronco (Kg)</b>	10.22	12.37	2.15
<b>Biomasa total en frutos (Kg)</b>	2.50	-	2.50
<b>Biomasa aérea total (Kg)</b>	<b>33.04</b>	<b>21.81</b>	<b>11.23</b>

Fuente: López, 2008.

#### 4.3 Ecuaciones alométricas.

La cuantificación física de biomasa (técnica destructiva) consume mucho tiempo, especialmente en la medición de ciertos componentes como el follaje y las ramas; por eso se justifica el desarrollo de métodos indirectos (generación de modelos) para estimar la biomasa (Pérez y Kanninen; citados por Montero y Kanninen, 2002).

Los resultados de el análisis de correlación entre la variable de entrada (diámetro) y la variable de salida (biomasa aérea seca total), presentó una alta correlación en la relación (dependencia) lineal entre las dos variables en cada especie. En *Cratylia* el coeficiente de correlación fue de  $r= 0.82$  y en *Morera* de  $r= 0.84$ ; estos valores nos indican que el diámetro puede utilizarse para estimar la biomasa total. Segura y colaboradores (2000), utilizaron valores de  $r= 0.83$  entre las mismas variables para construir modelos alométricos que estimaran la biomasa total en un bosque húmedo en Costa Rica.

La magnitud de la relación entre la altura total de las plantas y la biomasa seca total es inferior en relación a la estimación anterior, presentándose valores en los coeficientes de correlación de  $r = 0.66$  en la especie *Cratylia argentea* y  $r = 0.69$  en *Morus alba*.

El hecho de que la altura no explique en gran medida la variabilidad de la biomasa seca total de las plantas podría deberse a la alteración de las copas por los tratamientos de podas que reciben.

Por ser el diámetro la variable mayor correlacionada con la biomasa seca total de las plantas muestreadas, se utilizó como variable de entrada en las ecuaciones alométricas.

Con la base de datos de los diámetros y biomasa seca total de las plantas de *Cratylia* y *Morera* muestreadas (Cuadro 2 y 4 en anexo), se elaboraron las

ecuaciones alométricas por medio del análisis de regresión lineal simple entre estas variables.

El modelo 2, con transformaciones logarítmicas en las variables correlacionadas de forma:  $\text{Log}_{10} y = -0.8967 + 1.8680 * \text{Log}_{10}(D_5)$  desarrollado para la especie *Cratyliia* y  $\text{Log}_{10} y = -1.2891 + 2.0996 * \text{Log}_{10}(D_5)$  para la especie de *Morera*, presentaron menor ajuste entre los valores estimados de biomasa y los valores reales de biomasa en las plantas. Con coeficientes de determinación de 0.63 en *Cratyliia* y 0.68 en *Morera*

El modelo  $y = \alpha + \beta x + \varepsilon$ , sin transformación logarítmica en las variables correlacionadas fue el modelo que mejor se ajustó a la biomasa seca real en ambas especies. El desarrollo de las ecuaciones alométricas con este modelo en ambas especie se describen a continuación.

- **Análisis de varianza del modelo para *Morus alba***

El análisis de varianza en el cuadro IV muestra una alta significancia estadística con una probabilidad de error de 0.0001. Esto significa que la regresión es significativa, es decir, si hay relación entre el diámetro y la biomasa aérea seca total de las plantas de *Morera*.

Esta relación nos indica que el diámetro puede ser utilizado para predecir la biomasa aérea ya que existe una correspondencia en la producción de biomasa seca de las plantas de *Morera* en función del diámetro.



**CUADRO IV. ANÁLISIS DE VARIANZA DEL MODELO PARA *Morus alba***

Fuente	G.L	S.M	M.C	Valor de F	Prob.>F
Modelo	1	2.51535	2.51535	30.640	<b>0.0001**</b>
Error	13	1.06721	0.08209		
Corrección Total	14	3.58256			

\*\* : Nivel de significancia (P < 0.01)

Los valores generados para los parámetros estimadores en la ecuación de regresión de Morera se presentan en el cuadro V. Se observó significancia para ambos coeficientes, lo que nos reafirma que hay relación entre las variables analizadas y que pueden ser utilizados para la predecir de la variable dependiente (biomasa seca total).

Tal y como se muestra en el cuadro V, el valor generado para el intercepto ( $\alpha$ ) es de -1.291586 y para la pendiente ( $\beta$ ) es de 0.571204. El valor positivo en la pendiente ( $\beta$ ) no indica que la magnitud de la biomasa seca total de las plantas de Morera aumenta conforme el diámetro crece.

Calculados los parámetros de regresión, la ecuación alométrica para predecir la biomasa aérea seca total para cada planta de Morera es:

$$\text{Biomasa aérea seca total estimada} = -1.291586 + 0.571204 * (\text{Diámetro})$$

Esta ecuación generó valores estimados de biomasa seca total individuales muy cercanos a los valores de biomasa seca real (Cuadro 5 en anexo). Sin embargo, estimó en su totalidad la biomasa seca total producida por las 15 plantas

muestreadas; lo que nos garantiza una buena estimación de la biomasa seca en el sistema de banco de proteína.

**CUADRO V. COEFICIENTES DEL MODELO PARA *Morus alba***

Variable	G.L	Parámetro estimador	Error Estándar	T de HO: Parámetro = 0	Prob > ITI
Intercepto ( $\alpha$ )	1	<b>- 1.291586</b>	0.50149413	- 2.575	0.0231*
Diámetro ( $\beta$ )	1	<b>0.571204</b>	0.10319159	5.535	<b>0.0001**</b>

\* Significativo \*\* altamente significativo ( $P < 0.01$ )

El valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que se observa en el cuadro VI nos indica una relación lineal moderada entre la biomasa aérea seca total y el diámetro a cinco centímetros sobre el suelo. En particular, el 70.21 por ciento de la variabilidad entre los valores observados de la biomasa aérea seca total se explica por esta relación lineal. El restante 29.79 por ciento de la variación no se explica por medio de esta relación.

La variabilidad en los datos de biomasa real podría explicarse mejor introduciendo más variables independientes en los modelos alométricos. Según Segura *et al*, (2000), al utilizar ecuaciones alométricas con dos o más variables independientes como el dap y la altura total, se obtienen valores estimados más exactos y con mayor poder explicativo, es decir; modelos con mejor ajustes. No obstante, incluir más variables aumenta los costos del inventario.

En plantaciones con altas densidades de siembra como lo son los bancos de proteínas, inventariar la altura total de las plantas es complicado por el acceso a las plantas y está sujeto a más errores; ya que, las podas conducen a rebrotes en las plantas y en ocasiones es imposible distinguir la yema apical del tallo principal lo que conduce a estimaciones en ves de mediciones.

Los valores del cuadrado medio de error, del coeficiente de determinación ajustado y el coeficiente de variación que se presentan en el cuadro VI son tomados en cuenta generalmente para la selección de modelos de mejor ajuste (Segura *et al*, 2000).

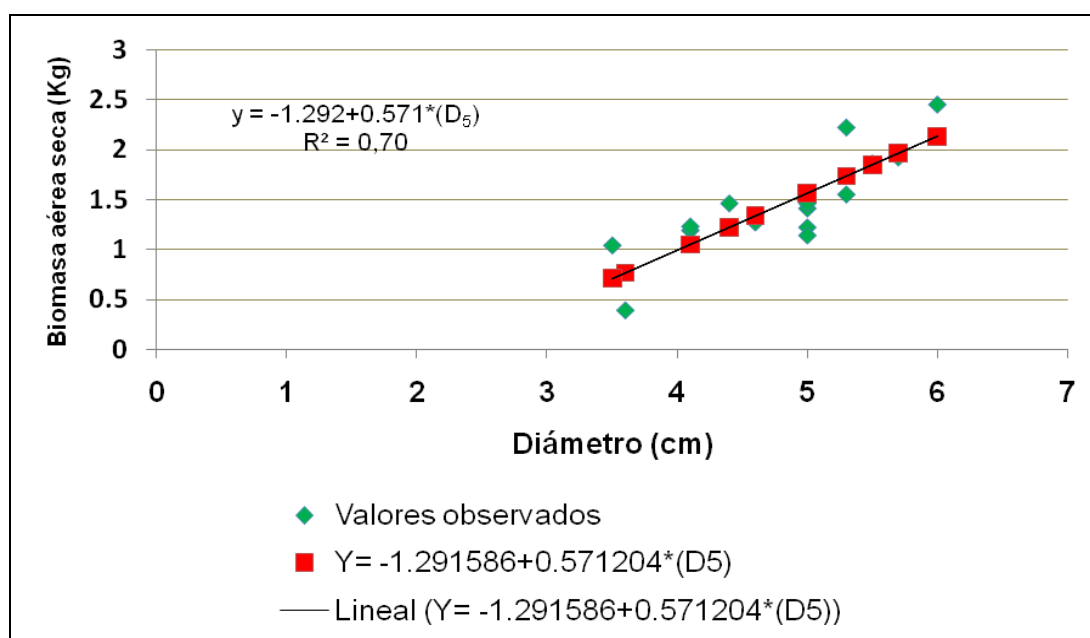
**CUADRO VI. ESTADÍSTICOS DEL MODELO PARA *Morus alba***

<b>Cuadrado Medio del Error (CME)</b>	<b>Coeficiente de determinación (<math>R^2</math>)</b>	<b>Coeficiente de determinación – Ajustado (<math>R^2</math>. Ajust)</b>	<b>Coeficiente de variación (C.V)</b>
0.28652	0.7021	0.6792	19.70554

La relación entre los valores reales de biomasa seca obtenidos directamente del muestreo destructivo de las plantas de Morera y los valores estimados a partir del modelo ajustado en función del diámetro de las plantas se muestran en la figura 6. Se puede observar una relación directamente proporcional entre el diámetro y la biomasa seca total de las plantas. A mayor diámetro mayor producción de biomasa seca, lo que nos indica que puede existir una relación

similar entre el diámetro y las cantidades de carbono en las plantas, ya que a mayor biomasa mayor carbono.

La dispersión alrededor de la línea de ajuste es el resultado de la variación natural entre las plantas, la cual se puede atribuir a la competitividad entre las plantas por la densidad de siembra y a los tratamientos de poda.



**FIGURA 6. RELACIÓN ENTRE LOS DATOS OBSERVADOS Y LOS PREDICHOS CON EL MODELO AJUSTADO PARA LA BIOMASA SECA TOTAL POR ÁRBOL DE *Morus alba*.**

Aunque la relación entre la biomasa seca total de las plantas y el diámetro sea una recta perfecta, la relación entre los valores individuales de la biomasa seca total y el diámetro no lo es. (Cuadro 5 en anexo).

- **Análisis de varianza del modelo para *Cratylia argentea***

El análisis de varianza en el cuadro VII muestra que la regresión es significativa ( $P < 0.02$ ), por lo que podemos asegurar que existe relación entre el diámetro a cinco centímetros del suelo y la biomasa aérea seca total en las plantas de *Cratylia*. Esto nos indica que podemos utilizar el diámetro como variable independiente en la predicción de la biomasa seca total.

**CUADRO VII. ANÁLISIS DE VARIANZA DEL MODELO PARA CRATYLIA**

Fuente	G.L	S.M	M.C	Valor de F	Prob.>F
Modelo	1	24.09242	24.09242	27.550	<b>0.0002**</b>
Error	13	11.36832	0.87449		
Corrección Total	14	35.46073			

\*\* : Nivel de significancia ( $P < 0.02$ )

El coeficiente de regresión ( $\beta$ ) resulto significativo con una probabilidad de error de 0.0002 lo que indica que su valor puede ser utilizado en la ecuación alométrica para generar valores estimados de biomasa aérea (Cuadro VIII). Este coeficiente representa el cambio en la biomasa por unidad del diámetro en las plantas.

Tal y como se muestra en el cuadro VIII el valor estimado para el intercepto ( $\alpha$ ) es de -1.686426 y para el coeficiente de regresión ( $\beta$ ) es de 0.912580. Entonces la ecuación alométrica para predecir la biomasa aérea seca total para cada planta de *Cratylia* es:

$$\text{Biomasa aérea seca total estimada} = -1.686426 + 0.912580 * (\text{Diámetro})$$

Esta ecuación al igual que la anterior también generó valores de biomasa seca total cercanos a los valores reales de biomasa seca de las plantas de *Cratylia*. (Cuadro 3 en anexo).

**CUADRO VIII. COEFICIENTES DEL MODELO PARA *Cratylia argentea***

Variable	G.L	Parámetro estimador	Error Estándar	T de HO: Parámetro = 0	Prob > ITI
Intercepto ( $\alpha$ )	1	<b>- 1.686426</b>	0.78122354	- 2.159	0.0502
Diámetro ( $\beta$ )	1	<b>0.912580</b>	0.17386300	5.249	<b>0.0002**</b>

En este análisis el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.6794. Esto revela que el modelo lineal explica el 67.94 por ciento de la variabilidad entre los valores observados de la biomasa aérea seca total real en las plantas de *Cratylia* (Cuadro IX). El restante 32.06 por ciento de la variación no se explica por medio de esta relación.

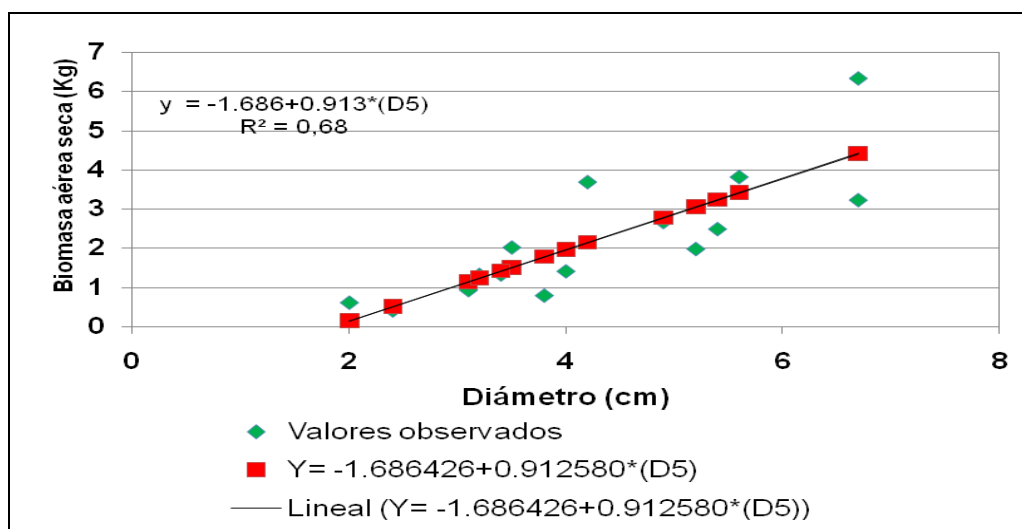
Se presentó una alta variabilidad con un coeficiente de variación del 42.25 por ciento, esto podría estar influenciado por la competencia entre las plantas que alteran su uniformidad, principalmente en el desarrollo del diámetro y por ende en la producción de biomasa aérea.

**CUADRO IX. ESTADÍSTICOS DEL MODELO PARA *Cratylia argentea***

Cuadrado Medio del Error (CME)	Coficiente de determinación ( $R^2$ )	Coficiente de determinación – Ajustado ( $R^2$ . Ajust)	Coficiente de variación (C.V)
0.93514	0.6794	0.6548	42.25028

Según Suárez, Segura y Kanninen (2004), las podas que se realizan como parte del manejo cultural de las plantaciones; aumentan la variabilidad de los datos y los ajustes de los modelos.

En la figura 7 se muestra la dispersión de los datos observados de biomasa seca real total de cada planta de *Cratylia* y los estimados por la recta de regresión del modelo en función del diámetro. La relación que se observa es directamente proporcional entre las variables, conforme aumenta el diámetro en las plantas mayor es la cantidad de biomasa seca.



**FIGURA 7. RELACIÓN ENTRE LOS DATOS OBSERVADOS Y LOS PREDICHOS CON EL MODELO AJUSTADO PARA LA BIOMASA SECA TOTAL POR ÁRBOL DE *Cratylia argentea*.**

Los modelos generados en esta investigación solo pueden ser utilizados para predecir la biomasa producida en un tiempo de siete meses después de una poda a 80 centímetros sobre el suelo. Esta condición en particular de los modelos en este tipo de sistemas agroforestales de banco de proteína se debe a que la producción de biomasa esta fuertemente relacionada con las frecuencias y altura de poda a las que son sometidas las especies que constituyen los bancos. Por tal motivo sería interesante incluir como variable independiente en futuras ecuaciones alométricas las frecuencias y la altura de poda de las plantas, con las cuales se obtendrían modelos quizás con mayor alcance, mejor ajuste y mayor utilidad según el manejo dentro de los bancos forrajeros.

Según Segura, Kanninen, Alfaro y Campos (2000); la aplicación de modelos o ecuaciones alométricas que incluyen el diámetro como única variable independiente es limitada. Consideran que estos tipos de modelos presentan en ocasiones un bajo poder explicativo. Sin embargo, la ventaja de este tipo de ecuaciones de una entrada es que los cálculos son muy simples; además, se trata de una variable que es fácil de obtener en el campo y que se registra en la mayoría de los inventarios forestales.

Las limitaciones del uso de modelos alométricos para estimar biomasa esta en que solo son validos o efectivos en zonas ecológicas similares a las que fueron generadas y se debe tener en cuenta el ámbito de datos con los que se construyeron las ecuaciones. De lo contrario se caería en errores que alterarían los resultados estimados. (Montero y Kanninen, 2002)



#### **4.4 Determinación de la biomasa seca total aérea (Bt) estimada en los bancos de proteína.**

Para el banco de proteína con la especie *Cratylia*, se estimó un total de 22.03 TMSha<sup>-1</sup> a través del modelo alométrico con mejor ajuste para esta especie. De igual manera, utilizando el modelo desarrollado para la especie *Morera* se estimó un total de 14.54 TMSha<sup>-1</sup> para esta especie.

Según Zavala *et al*, 2007 y Polo y Lara; citados por Polo (2008), la producción de biomasa de estas especies en bancos de proteína son afectadas significativamente por la densidad de siembra, altura de corte y la frecuencia de corte o poda.

Por lo anterior citado, se puede deducir que el potencial para secuestrar carbono en bancos de proteínas con especies leñosas esta directamente relacionado con las practicas de manejo que se realicen en estos sistemas. Entre más largo sean los intervalos de las poda mayor biomasa se producirá, lo que se convierte en mayor secuestro y almacenaje de carbono en la biomasa de las plantas.

#### **4.5 Determinación del contenido de carbono en la biomasa aérea de los bancos de proteína.**

En el banco de proteína de *Cratylia* se estimó un total de 11.02 TCha<sup>-1</sup> y en el banco de *Morera* un total de 7.27 TCha<sup>-1</sup> almacenado en la biomasa. La diferencia de 3.75 TCha<sup>-1</sup> entre ambas especies y a favor de la especie *Cratylia argentea*, demuestra la superioridad de esta leguminosa para secuestrar carbono de la atmósfera.

La diferencia en el contenido de carbono en la biomasa aérea de las especies esta relacionada con la cantidad de biomasa producida por las mismas. La mejor adaptabilidad de la especie *Cratylia argentea* a las condiciones edáficas y climáticas del lugar le han permitido desarrollarse mejor y producir más biomasa.

El contenido de carbono encontrado en la biomasa aérea del banco de proteína de *Morus alba* esta dentro del rango de carbono encontrado por Zavala, Rodríguez y Cerrato (2007), en la biomasa aérea de un banco de proteína con la misma especie con  $10,70 \pm 4,54 \text{ Mg ha}^{-1}/\text{año}$  (  $1\text{Mg} = 1\text{t}$ ); a una frecuencia de poda de 26 semanas. En nuestro caso la investigación se llevo a cabo luego de 28 semanas después de la poda del banco.

Ávila (2000), reportó valores de almacenamiento en la biomasa aérea de  $2.08 \text{ TCh}^{-1}$  y  $6.45 \text{ TCh}^{-1}$  en sistemas agroforestales de café con eucalipto de seis años y sistemas con pasto Brizanta en asocio con *Acacia mangium*, respectivamente. Según estos valores reportados por Ávila y los estimados en esta investigación, los bancos de proteína pueden competir con otros sistemas agroforestales. En general, los bancos de proteína tienen un gran potencial para secuestrar carbono de la atmósfera y almacenarlo en su biomasa aérea.

Es interesante resaltar que los bancos de proteínas son sistemas agroforestales que constantemente están secuestrando carbono de la atmósfera; ya que, las plantas se podan y en la generación de sus rebrotes secuestran y acumulan este elemento en su biomasa que continuamente se está produciendo. Por ejemplo, en esta investigación el 69.1 por ciento del carbono total contenido en la

biomasa aérea (hojas, ramas, frutos) en el banco de proteína de *Cratylia* corresponde al secuestrado durante el periodo de siete meses después de una poda a 80.0 centímetro del suelo.

#### **4.6 Comparación de las medias por contrastes ortogonales para el componente suelo.**

Los resultados del análisis de la comparación de medias de las variables del suelo se muestran en el cuadro X, en el cual se puede observar la diferencia significativa ( $P < 0.01$ ) en el contraste entre especies. Esto se atribuye a que el suelo con la especie *Cratylia argentea* presentó valores superiores en el porcentaje de materia orgánica y por ende en la concentración de carbono en el suelo influyendo cambios en la densidad aparente; en comparación con los resultados obtenidos en el suelo con la especie *Morus alba* que presentó niveles más bajos de materia orgánica.

El suelo con *Cratylia*, presentó un valor promedio de  $1.30 \text{ g/cm}^3$  en la densidad aparente, mientras que en el suelo con Morera se presentó un valor promedio de  $1.27 \text{ g/cm}^3$ . (Cuadro 1 en anexo)

El valor promedio de materia orgánica en el suelo con *Cratylia* fue de 3.7 por ciento, mientras que el suelo con Morera presentó un promedio de 3.1 por ciento (Cuadro 1 en anexo). Ambos valores son considerados niveles medianos de materia orgánica en los suelos; sin embargo, existe una diferencia de 0.6 por ciento en el contenido de materia orgánica entre el suelo con ambas especies.

Se determinó un valor promedio de 2.1 por ciento en la concentración de carbono orgánico en el suelo con *Cratylia*, superando el contenido promedio de 1.78 por ciento en el suelo bajo *Morera*, lo que representa una diferencia de 0.32 por ciento en la concentración de carbono orgánico en el suelo. Esto nos muestra la habilidad de la especie *Cratylia* en relación a la *Morera* en cuanto a la respuesta de rebrote que se traduce en mayor disponibilidad de biomasa aérea y deposición de hojarasca sobre la superficie del suelo.

#### CUADRO X. COMPARACIÓN DE MEDIAS UTILIZANDO CONTRASTES ORTOGONALES.

Fuente	G.L	S.M	M.C	Valor de F	Prob.>F
<b>Tratamientos</b>	5	14.40	2.88	84.20	0.0001
<b>Contrastes</b>					
<b>C.a vs M.a</b>	1	0.484	0.484	14.13	0.0027**
<b>M.O vs C.O dentro de especies</b>	1	0.041	0.041	1.19	0.2960 <sup>n.s</sup>
<b>M.O vs da entre especies</b>	1	0.255	0.255	7.46	0.0182*
<b>(M.O y C.O) vs da</b>	1	7.581	7.581	221.63	0.0001**
<b>(M.O y C.O) vs da entre especies</b>	1	0.218	0.218	6.37	0.0267*

n.s: No existe diferencia significativa

\*\* : Diferencia altamente significativa (P < 0.01)

\*: Diferencia significativa.

Donde:

**C.a** = *Cratylia argentea*      **M.a** = *Morus alba*

**M.O** = Materia orgánica      **da** = Densidad aparente

**C.O** = Concentración de carbono en la materia orgánica del suelo

En el contraste entre materia orgánica vs concentración de carbono en *Cratylia* y materia orgánica vs concentración de carbono en *Morera* no se presento

diferencia significativa. Lo que indica que la especie no tiene un efecto en la proporción de carbono presente en la materia orgánica del suelo. Este comportamiento se atribuye a que independientemente a las diferencias que existan en las cantidades de materia orgánica en el suelo para ambas especies, el porcentaje de concentración de carbono en el suelo corresponderá al 58 por ciento de esas cantidades de materia orgánica (Fassbernder, 1980).

En el suelo con *Cratylia* del 3.7 por ciento de materia orgánica, el 2.1 por ciento corresponde al 58 por ciento de la fracción o concentración de carbono presente en la materia orgánica del suelo. Para el suelo con *Morera* del 3.1 por ciento de la materia orgánica, el 1.78 por ciento aproximadamente corresponde al 58 por ciento de la fracción o concentración de carbono presente en la materia orgánica.

Por otro lado, se encontró diferencia significativa entre la variable materia orgánica y densidad aparente dentro de las especies. Esto nos indica que el tipo de especie influye en los niveles de materia orgánica y densidad aparente del suelo. La diferencia se atribuye a los niveles superiores en la materia orgánica del suelo en comparación con los de densidad aparente.

De igual manera se observó diferencia altamente significativa ( $P < 0.01$ ) entre las medias de materia orgánica y concentración de carbono contra la media de densidad aparente. Según Montenegro (2007), la materia orgánica del suelo tiene un efecto directo sobre la densidad aparente, de tal forma que a medida que disminuye la materia orgánica en el suelo se incrementa considerablemente

la densidad aparente y viceversa. Lo anterior citado puede explicar la diferencia encontrada en esta investigación.

La diferencia significativa observada en el último contraste entre las medias de materia orgánica y concentración de carbono contra la media de densidad aparente entre las especies confirman una vez más la influencia del tipo de especie sobre las variables del componente de suelo.

En general, las significancias encontradas entre las variables del suelo por efecto de las especies se atribuyen a la producción de biomasa entre ambas especies. A mayor depósito de biomasa sobre el suelo, mayor cantidad de material orgánico ha sido mineralizado y posteriormente acumulado en la materia orgánica del suelo aumentando así los niveles de concentración de carbono en el suelo y disminuyendo progresivamente la densidad aparente.

Los resultados demuestran la superioridad de la especie *Cratylia argentea* sobre la especie *Morus alba* en el proceso de secuestro de carbono en el componente de suelo, por medio de las mejoras en las propiedades de suelo que favorecen el aumento del almacenamiento del elemento carbono en el suelo.

#### **4.7 Estimación del carbono orgánico (cos) almacenado en el suelo con las especies *Cratylia argentea* y *Morus alba* (TCh<sup>-1</sup>).**

Se registró un promedio de 54.78 TCh<sup>-1</sup> en el componente suelo con la plantación de *Cratylia*, superando al almacenado bajo la plantación de *Morus* el cual registró un valor promedio de 45.27 TCh<sup>-1</sup>. Observándose una diferencia

en el contenido de carbono de  $9.51 \text{ TCh}^{-1}$ .

Para efectos comparativos se analizó el suelo circundante a los bancos de proteína, encontrándose un valor inferior de carbono como era de esperarse de  $43.56 \text{ TCh}^{-1}$ . Las diferencias en el contenido de carbono entre el suelo bajo las especies forrajeras y este último sin cobertura fueron de  $11.22$  y  $1.71 \text{ TCh}^{-1}$  entre el suelo bajo *Cratylia* y el suelo bajo *Morera* respectivamente. Estos valores ( $11.22$  y  $1.71$ ) pueden considerarse como el carbono secuestrado en el suelo a partir del establecimiento del sistema agroforestal.

La diferencia en la cantidad de carbono almacenado puede deberse a la mayor cantidad y calidad de biomasa que produce la especie *Cratylia*, la cual se traduce en aumento de la hojarasca sobre el suelo y su posterior mineralización. Esta condición también permite una mejor protección del suelo contra la erosión que según Ingram y Fernández; citados por la FAO, 2000; es uno de los agentes causantes de la pérdida directa del carbono en los suelos. También nos indican que las técnicas de conservación de suelo contribuyen a la protección del carbono secuestrado en este componente.

En este mismo sentido, se sustenta el mayor contenido de carbono en el suelo con *Cratylia* debido a la capacidad de las leguminosas de fijar el nitrógeno atmosférico al suelo. Considerado como un elemento limitante en la mayoría de los suelos; su presencia aumenta la macro y micro flora del suelo los cuales aceleran los procesos de humificación, agregación y sedimentación, los cuales según Jackson (1970), aumentan el contenido de carbono orgánico del suelo.

Estos procesos también son favorecidos por la mayor humedad en el suelo bajo la plantación de *Cratylia* producto de la mayor acumulación de hojarasca y cobertura aérea (efecto sombra) que proporciona esta especie sobre el suelo.

Las cantidades de carbono encontradas en el suelo con los bancos de proteínas se asemejan a las cantidades reportados por Andrade (2002); con  $64.14 \text{ TCh}^{-1}$  en un ultisol bajo una plantación de *Tectona grandis* con cuatro años después de su establecimiento. En una pastura natural reportó  $57.04 \text{ TCh}^{-1}$ .

Por otro lado, Montenegro (2007); cuantificó el carbono secuestrado en un suelo andosol con plantaciones de café bajo sombra reportando promedios de  $152 \text{ TCh}^{-1}$ , mientras que para las parcelas sin sombra encontró un promedio de  $165 \text{ TCh}^{-1}$ . El hecho de que sus resultados hayan superado a los encontrados en esta investigación se atribuye a la diferencia en el tipo de suelo.

Por su parte, Callo-Concha, Krishnamurthy, Alegre (2001); también cuantificaron el carbono almacenado en el suelo con sistemas agroforestales. Los resultados de su investigación mostraron contenidos de  $86.38$ ,  $110.51$  y  $113.54 \text{ TCh}^{-1}$  para sistemas de árboles dispersos en potreros, huertos caseros y café bajo sombra respectivamente.

En base a las comparaciones anteriores se puede asumir que las cantidades de carbono en el suelo dependen de los principales factores a largo plazo relacionados con la formación del suelo pero pueden ser fuertemente



modificados (degradados o mejorados) por los cambios en el uso del suelo y al manejo según su uso.

#### **4.8 Carbono total almacenado en los sistemas de bancos de proteína.**

La sumatoria del carbono contenido en el componente de suelo más el carbono contenido en la biomasa aérea en el banco de proteína de *Cratylia argentea* generó un total de 65.80 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup> superando al estimado en el banco de *Morus alba* con un total de 52.54 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup> (Figura 8). La diferencia en el contenido de carbono se debe únicamente a la diferencia marcada en la producción de biomasa entre ambas especies. A mayor producción de biomasa, mayor contenido de carbono en los componentes de almacenamiento.

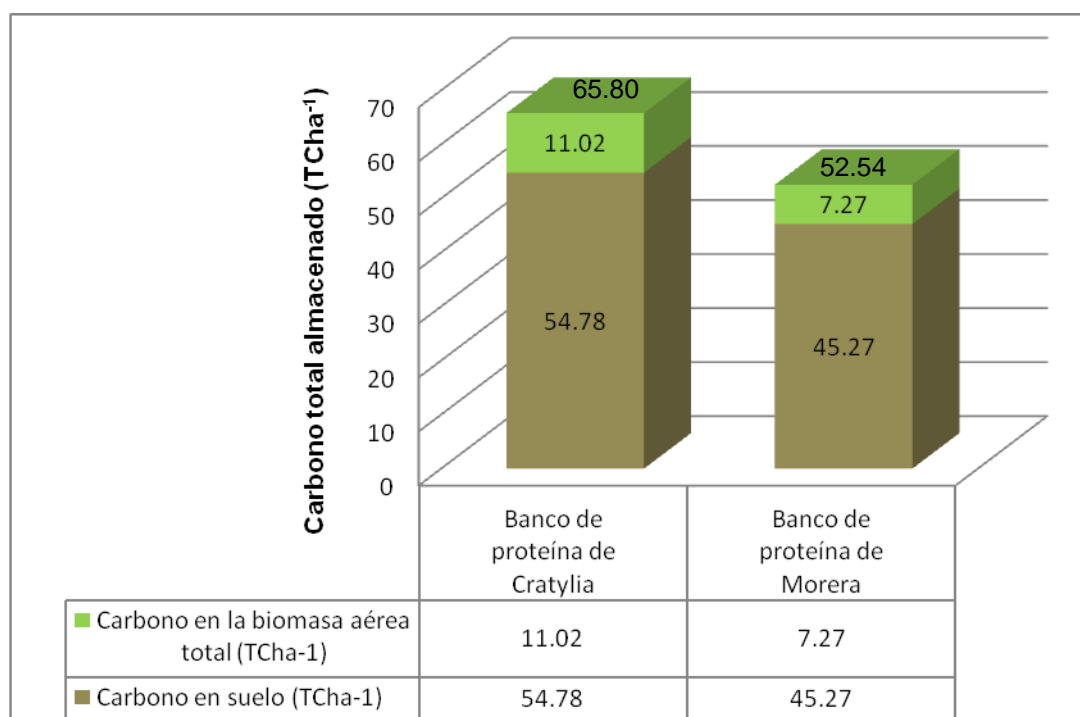
En ambos sistemas de banco de proteína se encontró mayor carbono almacenado en el componente de suelo que en la biomasa aérea de las plantas, lo que confirma lo señalado por MacDicken, citado por Ibrahim y Delgado (2003); los suelos son a menudo grandes almacenes de carbono orgánico.

Por su parte Callo-Concha, Krishnamurthy y Alegre (2001), también encontraron en el componente de suelo bajo usos de sistemas agroforestales más de la mitad del carbono total del sistema, considerando el suelo como un sumidero estable y considerable.

El carbono almacenado en el componente suelo es el producto del proceso de depósito y acumulación de restos orgánicos (vegetales) sobre el suelo que

progresivamente se descomponen y se mineralizan pasando a ser parte de la materia orgánica del suelo, almacenándose carbono continuamente con el pasar del tiempo siempre y cuando no exista un proceso externo que produzca la pérdida del elemento como lo es la erosión del suelo.

Por otro lado, el carbono almacenado en la biomasa aérea de las plantas es en gran parte obtenido del proceso del secuestro de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera a través del proceso de fotosíntesis en el que es transformado en hidratos de carbono.



**FIGURA 8. COMPARACIÓN DEL CARBONO TOTAL CONTENIDO EN LOS COMPONENTES DE ALMACENAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE BANCOS DE PROTEÍNA.**

La capacidad del componente de suelo para almacenar carbono es mucho más grande que el componente de biomasa aérea de las plantas; sin embargo; en esta investigación se ha encontrado que las cantidades de carbono que se almacenan en el componente de suelo dependen en gran parte del tipo de vegetación que este sobre este componente.

El carbono total contenido en el banco de proteína de la especie *Cratylia argentea* es igual al encontrado por Giraldo, Zapata y Montoya (2006), con 68.80 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup> en un sistema silvopastoril de seis años de edad, con una asociación del árbol leguminoso de *Acacia mangium* + la gramínea *Brachiaria dyctioneura* a una densidad de siembra de 169 árboles/ha. Su investigación tomó en cuenta los siguientes componentes: Parte aérea de árboles 35,52 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>, parte radical de árboles 7,08 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>, parte aérea de pastos 0,63 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>, parte radical de pastos 5,90 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>, en suelo (0-15 cm) 16.67 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>.

Los resultados del contenido de carbono encontrados en los árboles de este estudio (biomasa aérea) concuerdan con lo indicado por Kurstel y Burschel; citados por Ruiz (2002); señalan que la cantidad de carbono secuestrado directamente por los árboles dentro de diferentes sistemas agroforestales (SAF) oscilan entre de 3 a 25 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>". También concuerdan con lo señalado por Dixon; citado por Ruiz (2002); el potencial para el almacenamiento de carbono en SAF, incluyendo el carbono del suelo, oscila entre 12 y 228 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>, siendo el potencial para el almacenamiento de carbono mayor en el trópico húmedo.

## 5. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se acepta la hipótesis alternativa que afirma que las especies leñosas de los bancos de proteína contribuyen significativamente en el secuestro de carbono.
- Se acepta también la hipótesis alternativa que afirma que el suelo como almacén de carbono en los bancos de proteína contienen mayor cantidad de carbono almacenado en comparación con la biomasa aérea.
- El diámetro a cinco centímetros del suelo fue la variable más correlacionada con la biomasa aérea seca total de las plantas en ambas especies con coeficientes de correlación de  $r = 0.82$  en *Cratylia argentea* y  $r = 0.84$  en *Morus alba*.
- La correlación entre la altura total de las plantas y la biomasa aérea seca total fue más baja, con coeficientes de correlación de  $r = 0.66$  en *Cratylia* y  $r = 0.69$  en *Morera*.
- Las ecuaciones alométricas con mejor ajuste fueron significativas estadísticamente y los coeficientes de determinación explican un 68 por ciento de la variabilidad de los datos en *Cratylia* y un 70 por ciento de la variabilidad de los datos en *Morera*.
- La ecuación alométrica que más se ajustó a la biomasa aérea seca total en función del diámetro en las plantas de *Cratylia argentea* fue  $y = -1.686426 + 0.912580*(D_5)$  y la mejor ajustada para estimar la biomasa

aérea seca total en las plantas de *Morus alba* fue  $y = -1.291586 + 0.571204*(D_5)$ .

- El contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea varió entre las especies. En el banco de *Cratylia argentea* se determinó un total de 11.02 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>, mientras que en el de *Morus alba* se registró un total de 7.27 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>.
- La cantidad de carbono almacenado en el suelo con la especie *Cratylia argentea* fue de 54.78 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup> y en el suelo con *Morus alba* fue de 45.27 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>.
- La especie *Cratylia argentea* presentó mejor contribución al proceso de secuestro de carbono en el componente de suelo, mejorando el nivel de materia orgánica en el suelo.
- Se presentaron diferencias en el contenido total de carbono almacenado entre los sistemas agroforestales. En el sistema de banco de proteína con la especie *Cratylia argentea* se determinó un total de 65.80 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup> y en el sistema con *Morus alba* un total de 52.54 TCh<sup>a</sup><sup>-1</sup>.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuras investigaciones en bancos de proteína, que el inventario de carbono incluya un número mayor de muestras, tanto de suelo como de plantas con los que se puedan obtener resultados más confiables.
- Tomar en cuenta la hojarasca y las raíces de las plantas en los inventarios de carbono en sistemas agroforestales.
- Los inventarios deberán conocer con exactitud la proporción o fracción de carbono presente en la biomasa de la vegetación en estudio, enviando muestras al laboratorio y analizadas por métodos de calorimetría.
- Para construir posteriores modelos alométricos en bancos de proteína se recomienda muestrear como mínimo un total de 30 plantas. Además, se deberán tomar en cuenta variables como la frecuencia de poda y la altura de corte con las cuales es posible obtener ecuaciones con mejor ajuste y mayor utilidad.
- Ambientalmente la especie *Cratylia argentea* resulta más conveniente en las fincas agropecuarias de nuestro país como bancos de proteína por su mejor adaptabilidad a los suelos bajos en fertilidad y mayor producción de biomasa, lo que se traduce en mayor carbono secuestrado bajo estas

condiciones edáficas comunes en los suelos de producción de nuestro país.

- Utilizar la especie *Cratylia argentea* para otros sistemas agroforestales como por ejemplo en cultivos en callejones y como especie mejoradora de suelos degradados.
- Los bancos de proteínas en las fincas ganaderas deberían ser incluidos en futuros programas de pagos por servicios ambientales por su contribución al secuestro de carbono tanto en el suelo como en su biomasa aérea.
- Aumentar la superficie de los bancos de proteína del CEIACHI.

## 7. REFERENCIAS CITADAS

**Acosta, M; Quednow, K; Etchevers, J; Monreal, C. 2001.** Un método para la medición de carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de laderas en México: Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. (en línea) Valdivia, Chile. 1-2 p. Consultado el 27 de Octubre de 2007. Disponible en: <http://www.cl/simposiocarbono/Programa%20.htm>.

**ANAM (Autoridad Nacional del Ambiente). 2005.** Estrategia Nacional de Pagos por Servicios Ambientales. Panamá, República de Panamá. 3 p.

**Andrade, H; Ibrahim, M. 2003.** ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. Agroforestería en las Américas 10 (39-40):110- 112 p.

**Andrade, W. 2002.** Determinación del carbono Almacenado en el suelo bajo una plantación de *Tectona grandis* con cuatro años de edad. Finca Pampanillo. Futuro Forestal S.A. Las Lajas, Provincia de Chiriquí. Tesis Lic. Ing. Agrícola, con especialización en manejo de cuencas Hidrográficas. David, Chiriquí. República de Panamá. Universidad de Panamá. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 87-89 p.

**Argel, P; Lascano, C. 2001.** *Cratylia argentea*: Una nueva leguminosa arbustiva para suelos ácidos en zonas subhúmedas tropicales. (en línea) Turrialba, Costa Rica. 186-187 p. Consultado el 15 de octubre de 2008. Disponible en <http://www.fao.org/AG/aGa/agap/FRG/AGROFOR1/Lascan11.PDF>

**Arias, R. 2007.** Alternativas de producción ganadera amigables con el medio ambiente. (en línea). Guatemala, Guatemala. Consultado el 4 de Octubre de 2007. Disponible en: <http://www.G:\silvopastoril y medio ambiente.mht>

**Avila, G. 2000.** Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. (en línea). CATIE, Turrialba, Costa Rica. 64p. Consultado el 22 de Julio de 2008. Disponible en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0254E/A0254E.PDF>



**Bernardus, H. de Jong. 2001.** Cambio de Uso de Suelo y Flujos de Carbono en los Altos de Chipas, México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. (en línea). Valdivia, Chile. 33 p. Consultado el 20 de mayo de 2008. Disponible en: <http://www.uach.cl/procarbono/simposio/trabajos/>.

**Botero, J. 2006.** Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de Carbono. (en línea). Consultado el 15 de abril de 2008. Disponible en: <http://www.fao.org/Docrep/006/Y4435S/y4435s07.htm>

**Burbano, O. 1989.** El suelo: Una visión sobre sus componentes bioorgánicos. Pastos, Universidad de Nariño. 446-447p.

**Briscoe, C.B. 1990.** Manual de ensayos de campo con árboles de usos múltiples. Manual N°3. 143p.

**Callo-Concha, D.; Krishnamurthy, L.; Alegre, J. 2001.** Cuantificación del Carbono Secuestrado por algunos SAF's y Testigos, en tres pisos ecológicos de la Amazonia del Perú. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. (en línea) Valdivia, Chile. 20-21p. Consultado el 15 de mayo de 2008. Disponible en: <http://www.uach.cl/simposio/trabajos/53%20-%20Callo-Concha.PDF>

**Castillo, R. 2008.** Potencialidades de los sistemas con árboles para la producción animal en el trópico. (en línea). Consultado el 26 de junio de 2008. Disponible en: <http://www.corodebabel.com.ar/content/view/92/82/>

**Ciesla, WM. 1996.** Cambio Climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto. Roma, IT, FAO. 147 p.

**Delgadillo, M; Quechulpa, S. 2006.** Manual de Monitoreo de Carbono en Sistemas Agroforestales. (en línea). AMBIO, S.C de R.L. Chiapas, México. Consultado el 23 de abril de 2008. Disponible en: [http://www.imacmemexico.Org/file\\_download.php?location=s\\_u&filename=11616219271manual\\_mon\\_carbono\\_%282%29.pdf](http://www.imacmemexico.Org/file_download.php?location=s_u&filename=11616219271manual_mon_carbono_%282%29.pdf)

**FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2000.** Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO<sub>2</sub>. Roma, Italia. 22-24 p

\_\_\_\_\_ **2005.** Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. (en línea). Roma, Italia. Consultado el 12 de abril de 2008. Disponible en: <http://www.fao/dodrep/005/y2779s/y2779s00.htm>

**Fassbender, HW. 1980.** Química de suelo con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, I.I.C.A. 398 p. Forsythe, W. 1974. Manual de laboratorio de física de suelo. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de OEA. Turrialba, Costa Rica. 39-45 p.

**Fournier, L. 1996.** Fijación de carbono y diversidad biológica en el agroecosistema cafetero. Boletín Promecafe. N° 71: 7-8 p.

**Giraldo, L; Zapata, M; Montoya, E. 2006.** Captura y Flujo de Carbono en Silvopastoreo con Bovinos en el Trópico Colombiano. (en línea). Medellín, Colombia. Consultado el 1 de Agosto de 2008. Disponible en: [http://www.aida-itea.org/jornada38/sistemas/miscelanea/m6\\_giraldo.pdf](http://www.aida-itea.org/jornada38/sistemas/miscelanea/m6_giraldo.pdf)

**Gobbágy, E; Jackson, R. 2000.** La distribución de la materia orgánica del suelo en profundidad y por climas y tipos de vegetación y textura. (en línea). Consultado el 22 de julio de 2008. Disponible en: <http://weblogs.madrimasd.org/universo/Rss.aspx>.

**González, A. 2007.** Evaluación de la composición florística y las propiedades físicas y químicas del suelo de un Alfisol luego de 25 años de regeneración natural. Tesis Lic. Ing. Manejo Ambiental. David, Chiriquí. República de Panamá. Universidad de Panamá. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 25,26; 47-67 p.

**González, C. 2007.** Cuantificación del carbono secuestrado en un sistema agroforestal de café arbolado, en la Hacienda Bárbara, Jaramillo Arriba, Distrito de Boqueto, Provincia de Chiriquí. Tesis de Lic. Ing. Manejo Ambiental. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Panamá. 11 p.

**Ibrahim, M.; Mora-Delgado, J. 2003.** Potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales proyecto LEAD-CATIE. Turrialba; Costa Rica. 12 p.

**Instituto Nacional Geográfico Tommy Guardia. 1978.** Atlas de la República de Panamá. 3ed. Panamá, República de Panamá. 22 p.

**IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996.** Report of the twelfth session of the intergovernmental panel on climate change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. Ciudad de México, MX. 121 p.

**Jackson, M.L. 1970.** Análisis químico de suelo. Ediciones Omega, Barcelona, 662 p.

**Larcher, W. 1969.** Physiological approaches to the measurement of photosynthesis in relation to dry matter production by trees. *Photosynthetica* 3(2):150-166.

**MacDicken, K. 1997.** A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. (en línea) Winrock International, 1611N. Kent St; Suite 600, Arlington, va 22209, USA. 87 p. Consultado el 30 de octubre de 2007. Disponible en: [WWW.Virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo5.htm](http://WWW.Virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo5.htm)

**Matthews, D.E., Guzmán, L, y Hansen, D.E. 1960.** Clasificación agrológica, Capacidad de las tierras y agricultura del Sureste de la provincia de Chiriquí. Servicio Interamericano de Cooperación Agrícola en Panamá. Panamá, Ministerio de Agricultura, Comercio e Industrias. 135 p.

**Montenegro, J. 2007.** Cuantificación de carbono en el suelo bajo un sistema de café arbolado, en la Hacienda Bárbara, Jaramillo Arriba, Distrito de Boquete, Provincia de Chiriquí. Tesis de Lic. Ing. Forestal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad de Panamá. 67 p.

**Montero, M; Kanninen, M. 2002.** Biomasa y Carbono en Plantaciones de *Terminalia amazónica* en la Zona sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*. 39-40: 51 p.

**Moreno, F; Márquez, A; Guerrero, A; Chacón, C; Preston, T. 2002.** Árboles forrajeros promisorios para la producción agropecuaria, manejo y reproducción. (en línea). Cárdenas I, Montoni D y C Moreno (Eds) XIV jornadas técnicas de ganadería. UNET-San Cristóbal. 15 p. Consultado el 23 de mayo de 2008. Disponible en <http://www.unet.utafoundation.org>.

**Noda, Y; Martín, G; Machado, R; Garcíay, D; Medina, M. 2007.** Efecto de dos frecuencias y alturas de corte en la producción de biomasa de morera (*Morus alba* Linn.). (en línea) Cuba. 261 p. Consultado el 15 de octubre de 2008. Disponible en <http://www.ceniap.gov.ve/pbd/RevistasCientificas/pdf>

**Palm, C.A; k. Hariah y M. Van Noordwijk. 1999.** Muestreo revisado de carbono para ASB. Mimeografiado. Documento de trabajo. 7p.

**Pedro, A; Hidalgo, C; González, J. 2001.** Cultivar Veraniega (*Cratylia argentea* (Desv). O. Kntze) una leguminosa arbustiva para la ganadería de América Latina Tropical. Boletín técnico San José Costa Rica, Noviembre-2001. CIAT. Centro Internacional de Agricultura Tropical. 4-7 p.

**PRESA, S.A. 1980.** Estudios Agrológicos: Tierras Patrimoniales de la Facultad de Ciencias Agropecuarias en la Provincia de Chiriquí Informe Final. 6, 50 p.

**Riquelme, D. 2005.** El Pago por Servicios Ambientales, una Oportunidad para Contribuir al Desarrollo Sostenible de Panamá. (en línea). Panamá, Republica de Panamá. Consultado el 21 de mayo de 2008. Disponible en <http://www.anam.gob.pa/Unidad%20economia%20ambiental/imagenes/Articulo%20%20PSA%20una%20oportunidad%20para%20contribuir%20al%20desarrollo%20sostenible%20de%20Panama.pdf>

**Rodríguez, I; Guevara, E. 2002.** Producción de materia seca y valor nutritivo de la leguminosa arbustiva *Cratylia argentea* en el sur del estado Anzoátegui, Venezuela. (en línea) Anzoátegui, Venezuela. 590 p. Consultado el 15 de octubre de 2008. Disponible en [http://saber.ula.ve/revistacientifica/n12/pdfs/articulo\\_56.pdf](http://saber.ula.ve/revistacientifica/n12/pdfs/articulo_56.pdf).

**Ruiz, A. 2002.** Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. (en línea). CATIE, Turrialba, Costa Rica. Consultado el 20 de Julio de 2008. Disponible en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0265E/A0265E.PDF>

**Sánchez, M. 1999.** Sistemas agroforestales para intensificar de manera sostenible la producción animal Latino América. Dirección de Producción y Sanidad Animal. FAO. Roma. 12 p.

**Segura, M; Kanninen, M; Alfaro, M; Campos, J. 2000.** Almacenamiento y Fijación de Carbono en Bosques de Bajuras de la Zona Atlántica de Costa Rica. Revista Forestal Centroamericana. 30: 25 p.

**Suárez, D; Segura, M; Kanninen, M. 2004.** Estimación de la biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales en Matagalpa, Nicaragua, usado modelos alométricos. Presentado en: Revista Agroforestería de las Américas N° 41-42 2004. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 112-118 p.

**Steel, R; Torrie, J.H. 1985.** Bioestadística: Principios y procedimientos, 2da ed. Editorial McGraw Hill. 104,115 p.

**USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). 1993.** Laboratorio de Productos Forestales. Texas, USA. 2 p.

**Woomer,P.L. and C.A Palm. 1993.** Shifting cultivation effects on Tropical Soil Organic Matter. Experimental Protocol prepared for the Global Initiative for Alternatives to Slashand Burn Agriculture. Tropical Soil Biology and Fertility Programme. Nairobi, Kenya. Mimeografiado. 35 p.

**Zamora, S. 2006.** Efecto de los pagos por servicios ambientales en la estructura, composición, conectividad y el stock de carbono presente en el paisaje ganadero de Esparza, Costa Rica. (en línea). CATIE, Turrialba, Costa Rica. 31p. Consultado el 3 de junio de 2008. Disponible en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0265E/A0265E.PDF>

**Zavala, Y; Rodríguez, J; Cerrato, M. 2007.** Concentración de Carbono y Nitrógeno a Seis Frecuencias de Poda en *Tithonia diversifolia* y *Morus alba*. (en línea). Limón, Costa Rica. Consultado el 16 de Junio de 2008. Disponible en: [http://usi.earth.ac.cr/tierratropical/archivos-de-usuario/Edicion/58\\_v3.2-09\\_Zavala.pdf](http://usi.earth.ac.cr/tierratropical/archivos-de-usuario/Edicion/58_v3.2-09_Zavala.pdf)

# ANEXOS

**CUADRO 1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE MATERIA ORGÁNICA Y DENSIDAD APARENTE EN LAS MUESTRAS DE SUELO.**

Banco de proteína	Muestras	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Materia Orgánica (%)	Fracción de Carbono en la Materia Orgánica del Suelo (%)
Cratylia	1	1.36	3.8	2.20
	2	1.26	3.6	2.09
	3	1.24	3.6	2.09
	<b>Promedio</b>	<b>1.30</b>	<b>3.7</b>	<b>2.1</b>
Morera	1	1.21	2.7	1.57
	2	1.24	3.4	1.97
	3	1.36	3.1	1.80
	<b>Promedio</b>	<b>1.27</b>	<b>3.1</b>	<b>1.78</b>
<b>Control</b>	1	1.21	3.1	1.80

**CUADRO 2. DIÁMETROS Y BIOMASA SECA REAL POR COMPONENTE Y TOTAL EN LAS PLANTAS DE CRATYLIA.**

Planta (n)	D <sub>5</sub> (cm)	Biomasa seca real (Kg) = %MS x Pf (Kg)				
		Hoja	Fruto	Rama	Tronco	Aérea total
1	6.7	0.56	0.10	1.50	1.07	3.23
2	6.7	0.88	0.42	3.12	1.92	6.34
3	4.2	0.52	0.35	2.09	0.73	3.69
4	3.5	0.41	0.10	0.91	0.60	2.02
5	4.9	0.39	0.28	1.28	0.72	2.67
6	3.1	0.18	0	0.23	0.52	0.93
7	5.6	0.53	0.52	1.40	1.37	3.82
8	4.0	0.22	0.06	0.66	0.47	1.41
9	3.8	0.13	0	0.34	0.32	0.79
10	3.2	0.36	0.04	0.53	0.39	1.32
11	3.4	0.22	0.15	0.50	0.46	1.33
12	5.4	0.23	0.18	1.30	0.78	2.49
13	2.0	0.18	0.11	0.21	0.11	0.61
14	2.4	0.08	0	0.11	0.22	0.41
15	5.2	0.37	0.19	0.88	0.54	1.98
<b>Σ</b>	-	<b>5.26</b>	<b>2.50</b>	<b>15.06</b>	<b>10.22</b>	<b>33.04</b>

**CUADRO 3. BIOMASA SECA TOTAL REAL VS BIOMASA SECA TOTAL ESTIMADA POR LA ECUACIÓN ALOMÉTRICA EN LAS PLANTAS DE *Cratylia argentea***

Planta	Biomasa real (Kg)	Biomasa estimada (Kg) $Y = -1.68642 + 0.91258 \cdot (D_5)$
1	3.23	4,43
2	6.34	4,43
3	3.69	2,15
4	2.02	1,51
5	2.67	2,79
6	0.93	1,14
7	3.82	3,42
8	1.41	1,96
9	0.79	1,78
10	1.32	1,23
11	1.33	1,42
12	2.49	3,24
13	0.61	0,14
14	0.41	0,50
15	1.98	3,06
<b>Total</b>	<b>33.04</b>	<b>33,20</b>

**CUADRO 4. DIÁMETROS Y BIOMASA SECA REAL POR COMPONENTE Y TOTAL EN LAS PLANTAS DE MORERA.**

Planta (n)	D5 (cm)	Biomasa seca real (Kg) = %MS x Pf (Kg)			
		Hoja	Rama	Tronco	Aérea total
1	5.0	0.01	0.29	1.11	1.41
2	5.0	0.01	0.55	0.66	1.22
3	5.0	0.01	0.29	0.84	1.14
4	3.6	0.01	0.24	0.14	0.39
5	5.7	0.02	0.79	1.11	1.92
6	5.3	0.02	0.64	0.89	1.55
7	4.6	0.01	0.30	0.96	1.27
8	4.1	0.01	0.53	0.65	1.19
9	5.5	0.02	0.89	0.95	1.86
10	5.0	0.01	0.57	0.88	1.46
11	5.3	0.03	1.31	0.88	2.22
12	3.5	0.01	0.41	0.62	1.04
13	4.1	0.02	0.55	0.66	1.23
14	6.0	0.05	1.16	1.24	2.45
15	4.4	0.02	0.66	0.78	1.46
<b>Σ</b>	<b>-</b>	<b>0.25</b>	<b>9.18</b>	<b>12.37</b>	<b>21.81</b>



**CUADRO 5. BIOMASA AÉREA TOTAL REAL VS BIOMASA AÉREA TOTAL ESTIMADA POR LA ECUACIÓN ALOMÉTRICA EN LAS PLANTAS DE *Morus alba*.**

Planta	Biomasa rea (Kg)	Biomasa estimada (Kg) $Y = -1.291586 + 0.571204 \cdot (D_5)$
1	1.41	1,56
2	1.22	1,56
3	1.14	1,56
4	0.39	0,77
5	1.92	1,96
6	1.55	1,74
7	1.27	1,34
8	1.19	1,05
9	1.86	1,85
10	1.46	1,56
11	2.22	1,74
12	1.04	0,71
13	1.23	1,05
14	2.45	2,14
15	1.46	1,22
<b>Total</b>	<b>21.81</b>	<b>21,81</b>

**FIGURA 1. TITULACIÓN DE LAS MUESTRAS EN EL ANÁLISIS DE MATERIA ORGÁNICA.**



**FIGURA 2. ESTABLECIMIENTO DE LAS PARCELAS DE MUESTREO**



**FIGURA 3. SECADO DE LAS MUESTRAS AL HORNO Y TOMA DEL PESO SECO**



FIGURA 4. FLUJOGRAMA RESUMEN PARA EL MONITOREO DEL SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES (MACDICKEN, 1997).

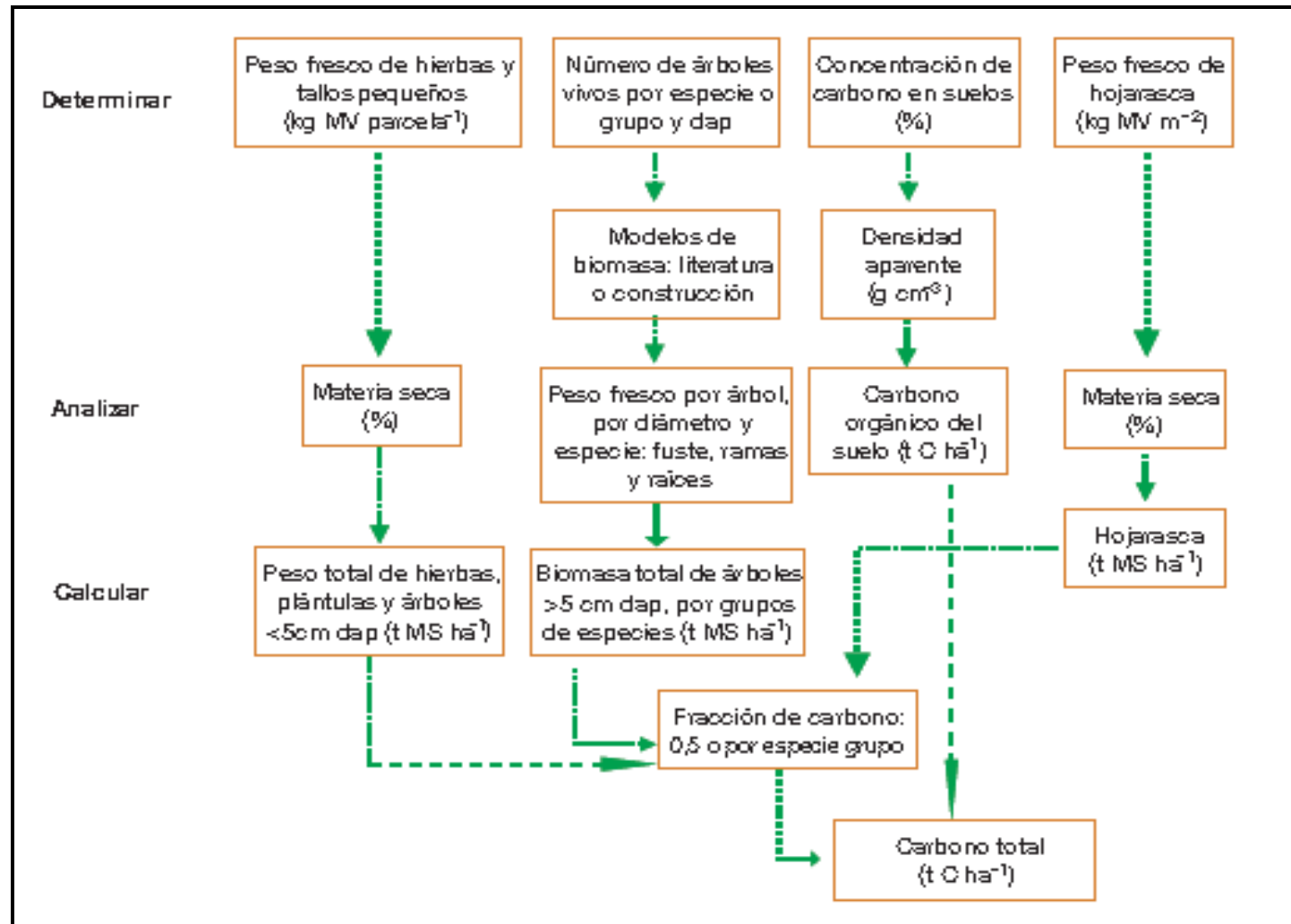


FIGURA 5. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO DENTRO DE LOS TERRENOS DEL CEIACHI EN LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS. (PRESA, SA, 1980).

