



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

**Balance de gases de efecto invernadero en un modelo de
producción de ganadería doble propósito con alternativas
silvopastoriles en Yaracuy, Venezuela**

por

Héctor Fabio Messa Arboleda

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

Magister Scientiae en Agroforestería Tropical

Turrialba, Costa Rica, 2009

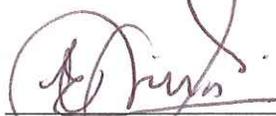
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA TROPICAL

FIRMANTES:

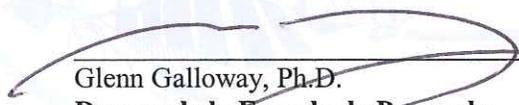

Muhammad Ibrahim, Ph.D.
Consejero Principal

Danilo Pezo, Ph.D.
Miembro Comité Consejero


Cristóbal Villanueva, M.Sc.
Miembro Comité Consejero


Hernán Andrade, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Adriana Florentino, Ph.D.
Miembro Comité Consejero


Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado


Héctor Fabio Messa Arboleda
Candidato

DEDICATORIA

A mis hijas Andrea Valentina y Fabiola Elisa por su eterna sonrisa y su gran amor...las amo.

A la memoria de Aquiles Escobar Boves, gran amigo y maestro... con mucho coraje!

A Colombia y Venezuela, dos naciones hermanas de tierra prodigiosa, gente noble y generosa...

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por acompañarme y fortalecerme en los momentos difíciles; por guiarme e iluminar siempre mi camino permitiéndome seguir adelante... **Gracias Señor**.

Deseo expresar mi mayor agradecimiento a todas las personas e instituciones que de una u otra forma contribuyeron para el logro de esta meta. Quiero nombrarlos a todos; tal vez la lista sea larga, pero quiero agradecerles; si hay alguna omisión, de antemano pido excusas.

A mi tutor, Dr. Muhammad Ibrahim por su amistad, apoyo, paciencia y enseñanzas. A los miembros del Comité Consejero: Dra. Adriana Florentino de Andreu, Dr. Danilo Pezo, M.Sc. Cristóbal Villanueva, Dr. Hernán Andrade y M.Sc. Tangaxuhan Llanderal; quienes me brindaron su apoyo, enseñanzas y valiosos aportes para el desarrollo y culminación del presente trabajo.

A los profesores Gustavo López, Argenis Mora y Fernando Casanoves por su apoyo en los análisis estadísticos. A los profesores Carlos León-Velarde y Raúl Cañas por su apoyo y enseñanzas en el manejo del programa *LIFE-SIM*. A los profesores Jairo Mora y Andreas Nieuwenhuyse, por sus recomendaciones.

Al Dr. Glenn Galloway por su gran apoyo durante mi permanencia en el CATIE. A todo el personal de la Escuela de Posgrado del CATIE: Hannia Fernández, Jeannette Solano, Aranjid Valverde, Yoset Mata, Marta González, Ariadne Jiménez y Alfonso. A la Dra. Rosita Jara por todo su apoyo profesional y amistad. A Don Rigoberto y a todo el personal de la Biblioteca Conmemorativa Orton. Al personal del Grupo GAMMA: Luis Aguilar, María Amable, Luis Quiroz, Francisco Casasola, Ney Ríos, Cristóbal Villanueva, Claudia Sepúlveda, Ghiselle Alvarado, Leonardo Guerra y Paulo Dittel. A todos los profesores del CATIE por sus enseñanzas y amistad.

A la Fundación Empresas Polar por el apoyo económico en mis estudios y para el desarrollo

de esta investigación. A la Fundación Danac por facilitar sus instalaciones para la investigación, al Programa de Agricultura Tropical Sostenible por permitir que mi trabajo se desarrollara en el Modelo de Granja Integral. A la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela (UCV) por brindarme las herramientas para mi formación profesional. Al personal del Laboratorio de Física de Suelos de la UCV por su apoyo en la realización de los análisis de suelos y la enseñanza brindada.

A la Dra. Yusmary Espinoza y Lic. Lesly Malpica del laboratorio de Microbiología de Suelos del CENIAP-INIA, por su apoyo en la realización de las determinaciones de carbono en el suelo y enseñanzas durante mi pasantía. Al personal del laboratorio General de Suelos y laboratorio de Nutrición Animal del CENIAP-INIA.

Al Profesor Aquiles Escobar (q.e.p.d.) por brindarme su amistad, apoyo, conocimientos y ganas de seguir adelante. Al Dr. Enrique Murgueitio, Director de la Fundación CIPAV, por su apoyo para iniciar mi maestría en el CATIE, amistad, valiosos consejos e ideas para el desarrollo del trabajo de tesis. A la Dra. Graciela Pantin, Lic. Alejandro Reyes, Ing. Ricardo Alezones y Lic. Elizabeth Monascal por confiar en mí y apoyarme. A los Drs. Fernando Ajmad, Gerente General de Fundación Danac, y Jhony Salaverría, Coordinador del Programa ATS por su valioso y permanente apoyo. Al profesor Adolfo Cardozo por su amistad y enseñanzas en la búsqueda de mejorar los sistemas de producción pecuaria y valorar lo nuestro. Al TSU Carlos Valles por su apoyo en la logística durante el trabajo de campo, a mi “compadrito” TSU Geovanny Chirino por su apoyo con los datos climáticos y recomendaciones para el muestreo de suelos. Al TSU Alirio Piñuela por su apoyo y amistad. A todos mis compañeros de trabajo del Programa ATS y Fundación Danac. A los Ings. Carlos Chedas y Virgilio Ramos por su apoyo en la generación del mapa del área de estudio. Al Ing. César Cuartas de Fundación CIPAV por sus aportes en la revisión del anteproyecto de tesis.

A Mario Chacón (Mae Mario) por sus extensas horas de enseñanza, amistad y apoyo de siempre. A Ney, Angelita e hijas por su solidaridad y apoyo en los momentos difíciles. A Andrés La Roche y Jorge Chagoya por su amistad, compañerismo y apoyo. A Wilson Calero

y familia, por su amistad, apoyo en los momentos difíciles y logros compartidos.

Al Dr. Juan Carlos Rey y TAI Manuel Mújica del INIA y Prof. Elena Vera de la UCLA, por su apoyo en la caracterización de los suelos del área de estudio. A los señores Orlando Piña y Pedro Betancourt por su apoyo en el largo y arduo trabajo de campo. A los Ings. Dumas Conde y Luis Peña por su apoyo en los inventarios de especies arbóreas. Al Prof. Luis Hernández Chong por la identificación de las muestras botánicas. A los profesores Selina Camacaro, Gonzalo Martínez y Pablo Silva de la UCV por su amistad y apoyo.

A mis queridas hijas Andrea Valentina y Fabiola Elisa por su paciencia, comprensión y amor de siempre. A Héctor, mi padre (q.e.p.d) por su fortaleza y enseñanzas de vida; a mi madre Anabel por sus consejos y estímulo para seguir siempre adelante; a mi hermana Maribel. A Amparo Ostos por su apoyo. A la familia Ostos García por su apoyo y solidaridad: Ing. Pedro Ostos, señora Amparo, Pedro, Milagros y Antonio Tordonato. A mi gran amigo Rogelio Quijada, por brindarnos la alegría de vivir la vida cada día.

A mis amigos y amigas del CATIE: Argenis, Carmen y Soleil Mora García; Jeannette Cárdenas, Jesús, Evita y Marvin Orocú; Jhon Jairo Zuluaga, Vicky y familia; Jairo Rojas, Yaneth y familia, Sonia Ospina, Julio Muñoz, Milka y familia; Eduardo Murrieta, Jaqueline y Edú; Angel Sol y familia; Manuel Serrano y familia; Marvin Merlo y familia; Blanca y Sergio; Doña Gladys Vanegas, Pedro Carrillo, Arturo Medina, Titi Evans, Isabel (Shakira), Gustavo Basil (El Ché), Johanna Romero, Piedad Zapata, Jean Alexander, Marito y Mónica, Luis Orozco, Marlon y mi paisana Natalia (la más terca de CATIE).

¡A todas y todos, por su apoyo incondicional, amistad y solidaridad; por siempre muchísimas gracias..!

BIOGRAFÍA

Héctor Fabio Messa Arboleda nació en Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Se graduó como Ingeniero Agrónomo mención Zootecnia en la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela en el año 1993. Ha ampliado su formación académica y profesional mediante la participación en diferentes actividades de capacitación relacionadas con sistemas sostenibles de producción agropecuaria.

Durante sus estudios en la UCV, Héctor Fabio, fue preparador de la Cátedra de Mecanización Agrícola. En el campo profesional se desempeñó como investigador y extensionista contratado en el Proyecto “Recursos Alimenticios para una Producción de Leche y Carne Sostenible” (UCV-CONICIT) en los Estados Yaracuy y Falcón, Venezuela. Posteriormente, laboró como docente a tiempo convencional de la Cátedra de Mecanización Agrícola de la Facultad de Agronomía de la UCV. Se desempeñó como Ingeniero de Campo en Inversiones Agropecuarias “Los Médanos” en Yaracuy. Desde 1996 hasta la actualidad, es Técnico Investigador del Programa Agricultura Tropical Sostenible de Fundación Empresas Polar, donde comparte responsabilidades en proyectos de investigación, capacitación y extensión dirigidos a productores agropecuarios, familias en zonas rurales, estudiantes y técnicos de diferentes áreas. Ha participado como ponente en eventos técnico-científicos y ha sido asesor de pasantías y tesis de grado de estudiantes universitarios. Culminó su maestría en Agroforestería Tropical en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en el año 2009; donde, bajo la tutoría del Dr. Muhammad Ibrahim, orientó su trabajo de investigación en el tema de secuestro de carbono y balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
BIOGRAFÍA.....	7
CONTENIDO.....	8
RESUMEN.....	13
SUMMARY.....	15
ÍNDICE DE CUADROS.....	17
ÍNDICE DE FIGURAS.....	20
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	22
1 INTRODUCCIÓN.....	24
1.1 Objetivos.....	27
1.1.1 Objetivo general.....	27
1.1.2 Objetivos específicos.....	27
1.1.3 Hipótesis de estudio.....	28
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	29
2.1 Características de las tierras y la actividad agrícola en Venezuela.....	29
2.1.1 Vegetación.....	29
2.1.2 Limitaciones y potencialidades de las tierras.....	30
2.1.3 Características generales de la actividad agrícola en Venezuela.....	31
2.2 Sistemas de ganadería de doble propósito.....	31
2.2.1 Importancia de los sistemas de ganadería de doble propósito.....	32
2.2.2 Impacto ambiental y social de la ganadería en América Latina.....	32
2.3 Ciclo del carbono.....	34
2.3.1 La materia orgánica del suelo.....	35
2.3.2 Importancia de la materia orgánica del suelo.....	36
2.3.3 Factores que determinan el contenido de materia orgánica del suelo.....	36
2.3.4 Efecto de las actividades antropógenas sobre el ciclo del carbono.....	37
2.4 El efecto invernadero.....	38

2.4.1	Incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.....	39
2.4.2	Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas ganaderos.....	40
2.4.3	Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas.....	40
2.4.4	Factores asociados al incremento de la concentración atmosférica de los principales gases de efecto invernadero.....	41
2.4.4.1	Dióxido de carbono.....	41
2.4.4.2	Metano.....	42
2.4.4.3	Óxido nitroso.....	44
2.5	El cambio climático y su relación con las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector agropecuario.....	46
2.5.1	Efectos esperados del cambio climático.....	46
2.5.2	Opciones para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector agropecuario.....	46
2.5.3	Contribución de los sistemas agroforestales al secuestro de carbono.....	47
2.6	Importancia de los sistemas silvopastoriles en la producción ganadera.....	49
2.6.1	Principios para el desarrollo de los sistemas silvopastoriles.....	50
2.6.2	Potencial de los sistemas silvopastoriles en el secuestro de carbono.....	52
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	53
3.1	Localización y descripción del área de estudio.....	53
3.1.1	Condiciones biofísicas.....	54
3.1.2	Tipos de uso de la tierra en el MF-ATS.....	57
3.2	Tipos de usos de la tierra evaluados.....	59
3.2.1	Historia de manejo y caracterización de los tipos de uso de la tierra bajo estudio.....	59
3.2.1.1	Bosque primario.....	60
3.2.1.2	Sistema de pasturas en callejones.....	60
3.2.1.3	Banco forrajero de <i>Gliricidia sepium</i>	62
3.2.1.4	Caña de azúcar.....	64
3.2.1.5	Pastura mejorada con árboles dispersos.....	65
3.2.1.6	Rotación de cultivos.....	66
3.3	Variables evaluadas y diseño de muestreo en los tipos de uso de la tierra seleccionados.....	67

3.3.1	Selección de las unidades de muestreo para el inventario de carbono	67
3.3.2	Evaluación de los parámetros físicos y químicos del suelo.....	69
3.3.3	Métodos analíticos.....	70
3.3.4	Análisis de datos de las variables físicas y químicas de suelos.....	74
3.4	Estimación de carbono en la biomasa aérea y en la necromasa	75
3.4.1	Componente arbóreo del bosque primario y pastura con árboles dispersos.....	75
3.4.2	Componente arbustivo de la pastura en callejones de <i>Leucaena leucocephala</i> y banco forrajero de <i>Gliricidia sepium</i>	80
3.4.3	Desarrollo de modelos alométricos para estimar la biomasa aérea en <i>Leucaena leucocephala</i> y <i>Gliricidia sepium</i>	84
3.4.4	Gramíneas	85
3.4.5	Necromasa sobre el suelo	86
3.5	Fijación de carbono en el sistema	88
3.5.1	Componente leñoso.....	88
3.5.2	Suelo.....	89
3.6	Caracterización del sub-sistema bovinos doble propósito.....	90
3.6.1	Manejo del rebaño de bovinos de doble propósito	90
3.6.2	Mediciones y determinaciones	92
3.6.3	Curva de lactancia	97
3.7	Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero.....	98
3.7.1	Emisiones de metano por fermentación entérica	99
3.7.2	Emisiones de metano por manejo del estiércol.....	102
3.7.3	Emisiones de óxido nitroso por manejo del estiércol	103
3.7.4	Simulación con el Modelo <i>LIFE SIM</i>	105
3.7.5	Emisiones directas de óxido nitroso procedentes del suelo	106
3.7.6	Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del uso de combustibles fósiles.....	107
3.8	Balance de gases de efecto invernadero.....	109
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	111
4.1	Biomasa y carbono del componente arbóreo	111
4.1.1	Bosque primario.....	111
4.1.2	Biomasa y carbono total del bosque primario.....	112
4.1.3	Modelos alométricos para <i>Leucaena leucocephala</i> y <i>Gliricidia sepium</i>	112
4.1.3.1	Muestra de <i>Leucaena leucocephala</i>	112

4.1.3.2	Muestra de <i>Gliricidia sepium</i>	113
4.1.3.3	Modelos alométricos desarrollados para estimar la biomasa de <i>Leucaena leucocephala</i> y <i>Gliricidia sepium</i>	115
4.1.4	Biomasa aérea y carbono total en pastura en callejones de <i>Leucaena leucocephala</i>	120
4.1.5	Biomasa aérea y carbono total en el banco forrajero de <i>Gliricidia sepium</i>	122
4.1.6	Biomasa aérea y carbono total de árboles dispersos en potrero	124
4.2	Biomasa y carbono en gramíneas	125
4.2.1	Biomasa y carbono total en gramíneas de la pastura en callejones.....	125
4.2.2	Biomasa y carbono total en caña de azúcar.....	128
4.2.3	Biomasa y carbono total en gramíneas de la pastura con árboles dispersos.....	129
4.3	Carbono en la necromasa.....	130
4.3.1	Carbono total en la hojarasca y detritos no finos del bosque primario	130
4.3.2	Carbono total en la hojarasca de la pastura en callejones de <i>Leucaena leucocephala</i>	131
4.3.3	Carbono total en la hojarasca del banco forrajero de <i>Gliricidia sepium</i>	132
4.3.4	Carbono total en la hojarasca de la pastura con árboles dispersos	133
4.4	Características físicas y químicas de los suelos.....	134
4.5	Carbono orgánico en el suelo	136
4.6	Reducción del contenido de carbono orgánico del suelo	142
4.7	Materia seca y carbono total almacenado en el sistema	144
4.7.1	Materia seca arriba del suelo.....	144
4.7.2	Carbono total en el sistema	147
4.8	Fijación de carbono en la biomasa aérea y el suelo.....	153
4.9	Análisis multivariado de las variables del suelo.....	157
4.9.1	Análisis de conglomerados	157
4.9.2	Análisis de componentes principales.....	160
4.10	Emisiones de gases de efecto invernadero en el subsistema bovinos doble propósito	165

4.10.1	Características del rebaño	165
4.10.2	Curva de lactancia	167
4.10.3	Valor nutritivo de los alimentos	168
4.10.4	Emisiones de gases de efecto invernadero en el subsistema bovinos de doble propósito	169
4.10.4.1	Emisiones de GEI procedentes del ganado	169
4.10.4.2	Simulación con el modelo <i>LIFE SIM</i>	177
4.10.4.3	Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del manejo del suelo	180
4.10.4.4	Emisiones de GEI procedentes del uso de combustibles fósiles	182
4.10.4.5	Emisión total de GEI del subsistema bovinos doble propósito	183
4.11	Balance general de gases de efecto invernadero.....	185
4.12	Reflexiones metodológicas	189
5	CONCLUSIONES	191
6	RECOMENDACIONES.....	193
6.1	A nivel de finca.....	193
6.2	Investigación, difusión y proyectos de pagos por servicios ambientales.....	194
7	BIBLIOGRAFÍA	195
8	ANEXOS	208

Messa A, HF. 2009. Balance de gases de efecto invernadero en un modelo de producción de ganadería doble propósito con alternativas silvopastoriles en Yaracuy, Venezuela. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 225 p.

Palabras clave: Balance de gases de efecto invernadero, secuestro de carbono, ganadería doble propósito, sistemas silvopastoriles, carbono orgánico del suelo, ecuaciones alométricas.

RESUMEN

A nivel mundial son conocidos los efectos del cambio climático; el cual, es consecuencia del incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, producto de actividades antropogénicas. Una meta prioritaria global es remover CO₂ de la atmósfera, esto es factible mediante la disminución de las emisiones y creando o mejorando los sumideros de carbono (C). Los sistemas silvopastoriles (SSP) constituyen tecnologías que contribuyen con la reducción de las emisiones de GEI mediante el secuestro de C en la biomasa vegetal y el suelo, mejorando la calidad de la dieta de los rumiantes y reduciendo el uso de fertilizantes nitrogenados en las pasturas. El objetivo de este estudio fue estimar la influencia de la distribución del tipo de uso de la tierra (TUT) en el almacenamiento de C total y en el balance de GEI en un sistema de ganadería de doble propósito (GDP). El estudio se realizó en la Granja Integral Sostenible “Aquiles Escobar Bovés” en zona de Bosque Seco Tropical en Yaracuy, Venezuela. Se seleccionaron diferentes TUT: bosque primario (BP), pastura en callejones de *Leucaena leucocephala* (PCL), banco forrajero de *Gliricidia sepium* (BF), cultivo de caña de azúcar (CAZ), pastura mejorada con árboles dispersos (PAD) y rotación de cultivos (ROT), asociados al sistema de GDP.

El carbono orgánico del suelo (COS) fluctuó entre 39,04 y 79,24 Mg ha⁻¹ m-eq; correspondiendo los mayores valores a los TUT BP y PAD y el menor al TUT CAZ. Los primeros 20 cm de profundidad del suelo concentraron entre el 44 y 63% del COS hasta 1 m-eq. El C total almacenado varió entre 63,79 y 233,20 Mg ha⁻¹, siendo 3,2 veces mayor en el TUT BP que el valor promedio de los TUT intervenidos. PCL, BF y CAZ almacenaron entre 27 a 29% del C total observado en BP; mientras que, en PAD alcanzó 43%. La tasa de

fijación de C fue 0,96; 2,56; 1,15 y 3,90 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para los TUT PCL, BF, CAZ y PAD, respectivamente. La remoción de CO₂ de los TUT estudiados osciló entre 3,52 y 14,30 Mg ha⁻¹ año⁻¹, correspondiendo los mayores valores a PAD y BF.

Las emisiones de GEI procedentes de la fermentación entérica y del manejo de las excretas del ganado variaron entre grupos etarios, con valores entre 0,70 a 2,94 Mg CO₂e animal⁻¹ año⁻¹; siendo mayores para el toro, vacas lactantes y novillas gestantes. Las vacas generaron el 60% de las emisiones de GEI del rebaño. En vacas lactantes, la emisión de metano fue mayor en época lluviosa que en época seca. Lo cual, se asoció a la composición de la dieta. La relación metano - producto fue de 35,43 y 44,49 g CH₄ para producción de leche total y leche vendible, respectivamente. En animales en crecimiento se obtuvieron valores entre 237,20 y 580,84 g CH₄ kg PV⁻¹. Los menores valores correspondieron a animales en crecimiento temprano y los mayores a novillas gestantes. A escala de finca, las emisiones de GEI variaron entre TUT y fuentes. Estas fluctuaron entre 4,37 y 17,34 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹. El TUT PCL emitió el 55% del total de GEI del sistema. No obstante, el mayor emisor por unidad de área fue el TUT ROT. El ganado contribuyó con el 79% de las emisiones, y de éstas el 78% fueron metano de origen entérico. Mientras que el 22% restante, correspondió a metano y óxido nitroso procedentes del manejo de las excretas. En el sistema de GDP se emitieron y removieron 7,43 y 5,84 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente, para un balance neto de 1,59 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹. En los TUT evaluados, el balance fue negativo para los TUT PCL y ROT. Sin embargo, el TUT PAD mostró remociones 47% mayores que las emisiones. Se evidencia, que los SSP presentan un alto potencial para la mitigación de las emisiones de GEI, por lo que constituyen una opción tecnológica a considerar en el desarrollo de sistemas sostenibles de producción agropecuaria.

El sistema GDP evaluado mostró la factibilidad de incorporar cambios que contribuyan de manera sustancial en la mejora del balance de GEI. Los proyectos futuros de pago por servicios ambientales en sistemas agropecuarios deben considerar el balance de GEI, de manera de estimular la toma de decisiones por los ganaderos y contribuir a la adopción de tecnologías amigables con el ambiente.

Messa A, HF. 2009. Balance of greenhouse gases in a model of dual-purpose livestock production with alternatives silvopastorals in Yaracuy, Venezuela. Thesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 225 p.

Keywords: Balance of greenhouse gases, carbon sequestration, dual-purpose livestock, silvopastoral systems, soil organic carbon, allometric equations.

SUMMARY

World wide the effects of climate change are known, which are a consequence of the increase of greenhouse gases (GHG) concentrations in the atmosphere resulting from anthropogenic activities. An overall goal is to remove CO₂ from the atmosphere, which is feasible by reducing emissions and creating or enhancing carbon (C) sinks. Silvopastoral systems are technologies that contribute to the reduction of GHG emissions through the sequestration of C in plant biomass and soil, improving the quality of the diet of ruminants and reducing the use of nitrogen fertilizers on pastures. The aim of this study was to estimate the influence of the distribution of the type of land use in the storage of total C and in the balance of GHG of a dual purpose livestock (GDP) system. The study was conducted in the Sustainable Integral farm "Aguiles Escobar Boves" in a Tropical Dry Forest zone in Yaracuy state, Venezuela. It was selected different land uses (TUT): primary forest (BP), pasture in alleys of *Leucaena leucocephala* (PCL), fodder banks of *Gliricidia sepium* (BF), sugar cane *Sacharum officinarum* crop (CAZ), improved pasture with scattered trees (PAD) and crop rotation (ROT), associated to GDP system.

The content of soil organic carbon (SOC) varied between 39,04 and 79,24 Mg ha⁻¹ m-eq, corresponding to the highest values to BP and PAD TUT and the minor to CAZ TUT. The first 20 cm of soil depth concentrated between 44 and 63% of the SOC until 1 m-eq. The total C stock varied between 63,79 and 233,20 Mg ha⁻¹, being 3,2 times greater in the BP TUT than the average value of intervened TUT. PCL, BF and CAZ TUT stored between 27 to 29% of total C observed in BP, whereas it reached 43% in PAD. The rate of C fixation was 0,96; 2,56; 1,15 and 3,90 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ for PCL, BF, CAZ and PAD TUT, respectively. The removals of CO₂ from TUT studied varied between 3,52 and 14,30 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, corresponding to the

highest values to PAD and BF TUT.

Greenhouse gases emissions from enteric fermentation and the handling of dung from livestock varied between age groups, with values between 0,70 to 2,94 Mg CO₂e animal⁻¹ yr⁻¹, being higher for the bulls, cows and pregnant heifers. The cows produced 60% of GHG emissions of the herd. In lactating cows, the methane emission was higher in the rainy season than in dry season. This was associated with the composition of the diet. The relationship methane - product was 35,43 and 44,49 g CH₄ for total milk and salable milk, respectively. In animals in growth were obtained values between 237,20 and 580,84 g CH₄ kg⁻¹ LW. The lowest values correspond to animals in early growth and higher to pregnant heifers. In farm scale GHG emissions varied between TUT and sources. These ranged between 4,37 and 17,34 Mg CO₂e ha⁻¹ yr⁻¹. The PCL TUT emit 55% of total GHG system. However, the largest emitter per unit area was the ROT TUT. Cattle accounted with 79% of emissions, and 78% of these were enteric methane source. While the remaining 22%, corresponded to methane and nitrous oxide from the dung management. In the system of GDP were released and cleared 7,43 and 5,84 Mg CO₂e ha⁻¹ yr⁻¹, respectively, for a net balance of 1,59 Mg CO₂e ha⁻¹ yr⁻¹. In the TUT evaluated the balance was negative for the PCL and ROT TUT. However, the PAD TUT showed 47% removals higher than emissions. It is clear that the silvopastoral systems have a high potential for the mitigation of GHG emissions, which constitute a technological option to consider in the development of sustainable agricultural production systems.

The evaluated system showed the feasibility to incorporate changes that would substantially contribute to improve the balance of GHG. Future projects for payment for environmental services in agricultural systems must consider the GHG balance, so to encourage the take of decisions by farmers and contribute to the adoption of environmentally friendly technologies.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Evolución histórica e incremento estimado de la concentración de tres gases de efecto invernadero.	40
Cuadro 2. Clasificación taxonómica de suelos del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela	56
Cuadro 3. Características químicas de los suelos del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	57
Cuadro 4. Tipos de uso de la tierra en el Modelo Físico de Agricultura Tropical Sostenible, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	58
Cuadro 5. Ecuaciones alométricas analizadas para estimar la biomasa aérea de árboles en un fragmento de bosque primario en San Javier, Yaracuy, Venezuela.	78
Cuadro 6. Ecuaciones alométricas analizadas para estimar la biomasa aérea de árboles en una pastura con árboles dispersos en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	80
Cuadro 7. Variables evaluadas en el sistema bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	93
Cuadro 8. Ecuaciones y coeficientes utilizados para estimar el consumo de energía bruta por bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	101
Cuadro 9. Factores utilizados para el cálculo de emisiones de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso procedentes del manejo del estiércol de bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	104
Cuadro 10. Clasificación por edad y número de partos de vacas del rebaño de bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	105
Cuadro 11. Factores para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero por quema de combustibles fósiles.	108
Cuadro 12. Relación de CO ₂ equivalente para metano y óxido nitroso.	110
Cuadro 13. Distribución de clases diamétricas, diámetro, altura total y densidad de árboles en un fragmento de bosque primario, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	111
Cuadro 14. Biomasa aérea y carbono total almacenado según la clase diamétrica de árboles en un fragmento de bosque primario, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	112
Cuadro 15. Distribución por clases diamétricas y variables dasométricas de arbustos de <i>L. leucocephala</i> para la determinación de biomasa aérea en el TUT PCL, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	113
Cuadro 16. Distribución por clases diamétricas y variables dasométricas de plantas de <i>G. sepium</i> para la determinación de biomasa aérea por muestreo destructivo en el TUT BF, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	114
Cuadro 17. Matriz de correlación de Pearson de la biomasa del tallo, la biomasa total y las variables dasométricas evaluadas de <i>L. leucocephala</i> (n=43).	115
Cuadro 18. Matriz de correlación de Pearson de la biomasa del fuste, biomasa total y las variables dasométricas evaluadas en <i>G. sepium</i> (plantas de 5 y 8 años de edad, n=33).	116
Cuadro 19. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa del tallo y la biomasa total de <i>L. leucocephala</i> en función del diámetro basal con sus estadísticos más importantes y la precisión de estimación.	117
Cuadro 20. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa del tallo y biomasa total de <i>G. sepium</i> en función del diámetro basal con sus estadísticos más importantes y la precisión de estimación.	119
Cuadro 21. Biomasa aérea y carbono total en arbustos de <i>L. leucocephala</i> en el TUT PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	122
Cuadro 22. Biomasa aérea y carbono total almacenado en arbustos de <i>G. sepium</i> en el TUT BF del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	124

Cuadro 23. Distribución de clases diamétricas, diámetro, altura total y densidad de árboles en el TUT PAD, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.....	125
Cuadro 24. Composición botánica de la pastura del TUT PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	126
Cuadro 25. Biomasa, hojarasca y carbono total presentes en planta entera y fracciones de caña de azúcar, variedad Canal Point 721210, TUT CAZ, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	128
Cuadro 26. Cantidad de hojarasca, detritos no finos y carbono total almacenado en un fragmento de bosque primario, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	130
Cuadro 27. Hojarasca, carbono total y tasa de acumulación de la hojarasca del TUT PCL, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.....	131
Cuadro 28. Hojarasca, carbono total presentes y tasa de acumulación de la hojarasca del TUT BF, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	133
Cuadro 29. Biomasa y carbono total presentes y tasa de acumulación de la biomasa de la hojarasca del TUT PAD, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	133
Cuadro 30. Inventario y proporción acumulada de carbono orgánico del suelo hasta un metro de profundidad equivalente (1 m - eq) en diferentes TUT, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	139
Cuadro 31. Inventario de materia seca arriba del suelo por tipo de uso de la tierra, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	146
Cuadro 32. Inventario de carbono total por tipo de uso de la tierra, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	148
Cuadro 33. Relación carbono orgánico en el suelo - carbono total, bajo diferentes TUT, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	152
Cuadro 34. Fijación de carbono en el componente arbóreo de diferentes TUT del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	154
Cuadro 35. Fijación de carbono orgánico del suelo de diferentes TUT del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 1999-2005.....	155
Cuadro 36. Resumen del análisis de componentes principales para las variables del suelo de 0 a 5 cm de profundidad, bajo diferentes TUT en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	161
Cuadro 37. Resumen del análisis de componentes principales para las variables del suelo de 5 a 20 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	162
Cuadro 38. Resumen del análisis de componentes principales para las variables del suelo de 20 a 40 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	163
Cuadro 39. Resumen del análisis de componentes principales para las variables del suelo de 40 a 100 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	164
Cuadro 40. Población y composición del rebaño de bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.....	166
Cuadro 41. Parámetros productivos y reproductivos del rebaño de bovinos de doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.	167
Cuadro 42. Emisiones de tres gases de efecto invernadero en bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.	170
Cuadro 43. Relación entre metano emitido por fermentación entérica y productos generados del subsistema bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	173
Cuadro 44. Emisión total de tres gases de efecto invernadero procedentes de bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.....	176
Cuadro 45. Parámetros obtenidos mediante simulación con el modelo <i>LIFE SIM</i> para vacas lactantes del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.....	177
Cuadro 46. Emisión total de dióxido de carbono equivalente procedente del manejo del suelo	

de los componentes asociados al subsistema bovinos doble propósito del MF–ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	180
Cuadro 47. Emisiones de tres gases de efecto invernadero procedentes del uso de maquinaria y equipo agrícola de componentes asociados al subsistema bovinos doble propósito del MF–ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	183
Cuadro 48. Emisiones anuales de CO ₂ e por fuente en el subsistema bovinos de doble propósito del MF–ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	184
Cuadro 49. Balance general de gases de efecto invernadero para el subsistema bovinos doble propósito del MF-ATS, Yaracuy, Venezuela. 2005.	187

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática del ciclo terrestre del carbono	35
Figura 2. Localización del sitio de estudio, San Javier, Estado Yaracuy, Venezuela	53
Figura 3. Climadiagrama de San Javier, estado Yaracuy, Venezuela (Período 1988-2005)..	55
Figura 4. Representación esquemática del diseño del muestreo para el inventario de carbono por uso de la tierra.	69
Figura 5. Representación esquemática de las parcelas rectangulares anidadas para el muestreo de carbono en la biomasa aérea del bosque y ubicación de la calicata principal.....	76
Figura 6. Representación esquemática de las parcelas para el muestreo de carbono en el suelo, biomasa aérea y necromasa de la pastura en callejones de <i>L. Leucocephala</i> del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.....	81
Figura 7. Representación esquemática del diseño de muestreo de carbono en el suelo, en la biomasa aérea y necromasa del banco forrajero de <i>G. sepium</i> del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	82
Figura 8. Relación entre el diámetro basal y a) biomasa observada del tallo, b) biomasa aérea total observada de arbustos de <i>L. leucocephala</i> en el TUT PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	117
Figura 9. Relación entre el diámetro basal y a) biomasa observada del tallo, b) biomasa aérea total observada en arbustos de <i>G. sepium</i> de 5 años de edad, en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	120
Figura 10. Relación entre el diámetro basal y a) biomasa observada del tallo, b) biomasa aérea total observada para arbustos de <i>G. sepium</i> de 8 años de edad, en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	120
Figura 11. Biomasa disponible, biomasa residual luego del pastoreo y carbono almacenado en la biomasa residual de la pastura del TUT PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período febrero – julio de 2005.	127
Figura 12. Biomasa disponible, biomasa residual y carbono total almacenado en la pastura en el TUT PAD del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período marzo – julio de 2005.	129
Figura 13. Distribución de la biomasa y carbono total de la hojarasca de acuerdo a la posición de muestreo con respecto a la doble hilera de <i>L. leucocephala</i> en el TUT-PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.....	132
Figura 14. Proporción promedio de carbono orgánico del suelo hasta un metro de profundidad bajo diferentes TUT, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.....	137
Figura 15. Disminución del contenido de carbono orgánico del suelo según modelo exponencial en diferentes TUT, San Javier, Yaracuy, Venezuela.	143
Figura 16. Distribución del carbono total por tipo de uso de la tierra, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.	149
Figura 17. Dendograma de agrupamiento de suelos por TUT para las profundidades: a) 0-5 cm (correlación cofenética = 0,539) y b) 5-20 cm (correlación cofenética = 0,651), San Javier, Yaracuy, Venezuela.	158
Figura 18. Dendograma de agrupamiento de suelos por TUT para las profundidades: a) 20-40 cm (correlación cofenética = 0,549) y b) 40-100 cm (correlación cofenética = 0,517), San Javier, Yaracuy, Venezuela.	158
Figura 19. Comportamiento anual de la producción de metano proveniente de la fermentación entérica en vacas doble propósito con parto en época seca y lluviosa..	178
Figura 20. Comparación de emisiones de dos gases de efecto invernadero estimadas por el modelo <i>LIFE SIM</i> y la metodología del IPCC.....	179
Figura 21. Balance general de gases de efecto invernadero para el subsistema bovinos doble	

propósito del MF-ATS, Yaracuy, Venezuela. 2005. 186

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Abreviaturas y siglas	Significado
AC	Análisis de conglomerados
ACP	Análisis de componentes principales
AEA	Agregados estables al agua
BF	Banco forrajero
BP	Bosque primario
C	Carbono
CAZ	Cultivo de caña de azúcar
CE	Conductividad eléctrica
CENIAP	Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias
CFC	Clorofluorocarbono
CH ₄	Metano
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
CIP	Centro Internacional de la Papa
CMCC	Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
COS	Carbono orgánico del suelo
CP	Componente principal
DAP	Diámetro a la altura del pecho
FAGRO	Facultad de Agronomía
FEP	Fundación Empresas Polar
FR	Forzamiento radiativo
GDP	Ganadería de Doble Propósito
GEI	Gases de efecto invernadero
HFC	Halurofluorocarbono
IEP	Intervalo entre partos
INIA	Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas
INSAI	Instituto Nacional de Salud Agrícola Integral
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LIFE SIM	<i>Livestock Feeding Strategies Simulation Models</i>

Abreviaturas y siglas	Significado
MARN	Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales
MDL	Mecanismo para un Desarrollo Limpio
m-eq	Metro de profundidad equivalente
MF-ATS	Modelo Físico de Agricultura Tropical Sostenible
MO	Materia Orgánica
MOS	Materia Orgánica del suelo
N ₂ O	Óxido nitroso
O ₃	Ozono
PAD	Pastura mejorada con árboles dispersos
PCG	Potencial de calentamiento global
PCL	Pastura en callejones de <i>L. leucocephala</i>
PSA	Pagos por servicios ambientales
PV	Peso vivo
ROT	Rotación de cultivos
SAF	Sistema agroforestal
SF ₆	Hexafluoruro
SSP	Sistema silvopastoril
TUT	Tipo de uso de la tierra
TVA	Tiempo de vida en la atmósfera
UA	Unidad animal
UCV	Universidad Central de Venezuela

1 INTRODUCCIÓN

Desde hace varios años a nivel mundial se ha manifestado una preocupación creciente en torno al incremento de la temperatura de la tierra (Rapidel *et al.* 1999). Durante el siglo pasado la temperatura media global de la superficie aumentó cerca de $0,6 \pm 0,2$ °C, este efecto de calentamiento, denominado cambio climático, es el resultado del incremento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera debido principalmente a las actividades humanas (IPCC 2001a).

Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua (H₂O) el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃) y los halocarbonos, estos últimos son de origen antropogénico. Estos gases absorben la radiación infrarroja emitida desde la superficie de la tierra, generando el incremento de la temperatura global (IPCC 2001a, MVOTMA 2003). Con base en modelos climáticos, se ha estimado que de no tomarse acciones para mitigar la tasa de emisión de GEI, la temperatura media global se incrementará entre 1,4 °C a 5,8 °C durante el presente siglo (IPCC 2001a).

En la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMCC)¹, realizada en Río de Janeiro (Brasil) en 1992, se estableció que las responsabilidades de los países son “comunes” pero “diferenciadas” de acuerdo con su capacidad y estado de desarrollo. También, se acordó como objetivo final la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera, de manera que permita prevenir la interferencia antropogénica peligrosa sobre el clima y minimizar los riesgos y efectos adversos sobre los ecosistemas (Kanninen 2000, MVOTMA 2003).

Posteriormente, en 1997, se firmó el Protocolo de Kyoto, y se acordó, que los países del Anexo 1² deberían asumir compromisos cuantitativos y jurídico vinculantes para reducir las emisiones colectivas de seis GEI (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆), en al menos un 5,2% para el período 2008-2012, tomando como base los niveles de 1990.

¹ CMCC = Siglas en español de *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC).

² Los países del Anexo 1 de la Convención del Cambio Marco sobre el Cambio Climático son los países desarrollados.

El Protocolo de Kyoto establece que para cumplir con las metas de reducción, los países desarrollados, pueden realizar actividades conjuntas con otros países para reducir o compensar sus emisiones de GEI. Esta concesión creó formalmente un nuevo mercado para los derechos de emisión, los servicios de reducción y compensación de emisiones y sus respectivos certificados (Pedroni 2000).

Con el Protocolo de Kyoto se crearon cuatro mecanismos de flexibilidad para cumplir con las metas de reducción de emisiones de GEI: la posibilidad de compartir los compromisos (*Burden Sharing*), la implementación conjunta (*Joint Implementation*), el mecanismo de desarrollo limpio (*Clean Development Mechanism*) y el comercio de derechos de emisión (*Emisión Trading*). La creación de estos mecanismos tuvo como propósito alcanzar el objetivo último de la CMCC³ de una manera flexible, al menor costo posible, y permitiendo que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible (Pedroni 2000).

Mediante el régimen de comercio de emisiones y el mecanismo para un desarrollo limpio (MDL), los países del Anexo 1 pueden implementar proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo y recibir créditos por ello en la forma de certificados de emisiones reducidas (Panos 2000). En el año 2005, Rusia ratificó el protocolo de Kyoto, suscrito por 128 países, por lo que el acuerdo entró en vigencia a partir del 16 de febrero de ese año.

Una meta prioritaria en el ámbito mundial, es remover CO₂ de la atmósfera (Montenegro y Abarca 2000). Este objetivo se puede lograr a través de la disminución de las emisiones antropogénicas de CO₂ y creando o mejorando los sumideros de carbono en la biosfera (Albrecht y Kandji 2003, Andrade e Ibrahim 2003). La mitigación de CO₂ a través de sumideros se basa en el supuesto de que estos pueden ser incrementados si los ecosistemas son manejados adecuadamente. En este contexto, las tierras agrícolas tienen el potencial de remover y almacenar entre 42 y 90 Pg⁴ de carbono de la atmósfera durante los próximos 50 a 100 años (Albrecht y Kandji 2003).

³ El objetivo último de la CMCC es “estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático”.

⁴ 1 Pg = 10¹⁵g

Los sistemas de producción agropecuaria que trasladen CO₂ de la atmósfera a un ciclo biótico y lo retengan por mayor tiempo dentro del agroecosistema, serán más sostenibles y convenientes (Montenegro y Abarca 2000). La agroforestería se percibe como una alternativa para tratar los problemas relacionados con el uso de la tierra y el calentamiento global (Albrecht y Kandji 2003). En este sentido, Montagnini y Nair (2004) señalan que el almacenamiento promedio de carbono por sistemas agroforestales es de 9, 21, 50 y 63 Mg C ha⁻¹ en regiones semiáridas, sub-húmedas, húmedas y templadas, respectivamente.

Los sistemas silvopastoriles constituyen una alternativa tecnológica para los sistemas de producción ganadera prevalentes en América Latina (Pagiola et ál. 2004). Ellos contribuyen con la reducción de emisiones de GEI mediante el secuestro de carbono en la biomasa vegetal y el suelo, mejorando la calidad de la dieta de los rumiantes y reduciendo el uso de fertilizantes nitrogenados en las pasturas. A pesar del alto potencial de secuestro de carbono de las tierras de pastoreo del trópico, existe resistencia a implementar los cambios necesarios para potenciar los esfuerzos de mitigación. Estas acciones tendrán mayores posibilidades de éxito si se integran las instituciones, se tiene un adecuado conocimiento del ecosistema y los bienes y servicios que brinda, y además, se provee a los productores de elementos para su seguridad alimentaria (Reid et ál. 2004).

Desde la perspectiva de los usuarios de la tierra, los servicios ambientales son externalidades. Sin embargo, el productor no los considera para la toma de decisiones sobre el uso del suelo; lo cual, probablemente reduce la posibilidad de adoptar prácticas que generen tales beneficios, incluyendo los sistemas silvopastoriles (Pagiola et ál. 2004). Desde hace algunos años, se promueve en algunos países el desarrollo de sistemas en los que los usuarios de la tierra sean compensados por los servicios ambientales que éstos proveen. En este sentido, los sistemas de pagos por servicios ambientales (PSA) representan un ejemplo de este enfoque (Pagiola et ál. 2004).

Cuantificar el almacenamiento de carbono y estimar el balance de GEI en el sistema permitirá comparar las cantidades emitidas y fijadas, analizar los factores que intervienen en el proceso y tomar decisiones en torno a su evolución. De esta manera, se podrá determinar si el sistema en estudio es un emisor o un almacenador neto y cuáles de sus componentes

influyen de manera positiva o negativa en el balance de gases.

Se espera que este trabajo contribuya con aportes metodológicos para la cuantificación del almacenamiento de carbono y emisiones de GEI en sistemas de producción ganaderos. De igual manera, se estima que en el futuro los PSA se hagan con base en el balance general de GEI del sistema de producción.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Estimar el impacto del uso de la tierra en el almacenamiento de carbono total y en el balance de gases de efecto invernadero en un modelo de producción de ganadería de doble propósito, en San Javier, Estado Yaracuy, Venezuela

1.1.2 Objetivos específicos

1. Cuantificar el almacenamiento de carbono total bajo diferentes tipos de uso de la tierra en un sistema de producción de ganadería de doble propósito en San Javier, Estado Yaracuy, Venezuela.
2. Estimar las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en el sistema de producción ganadero de acuerdo a la composición de la dieta de los animales.
3. Construir el balance de gases de efecto invernadero para un sistema de producción de ganadería de doble propósito en San Javier, Estado Yaracuy, Venezuela.

1.1.3 Hipótesis de estudio

1. El almacenamiento de carbono total en un sistema de producción ganadero varía de acuerdo a la distribución de usos de la tierra.
2. Las emisiones de gases de efecto invernadero (CH_4 y N_2O) varían de acuerdo al estado fisiológico de los animales y la dieta en un rebaño de bovinos de doble propósito.
3. El balance de gases de efecto invernadero en fincas ganaderas está influenciado por la distribución del uso de la tierra.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Características de las tierras y la actividad agrícola en Venezuela

La República Bolivariana de Venezuela se encuentra ubicada al Norte de América del Sur, sobre la Costa del Mar Caribe. Su territorio se enmarca dentro de las coordenadas geográficas 00° 38' 53"; 12° 12' 00" de latitud Norte y 59° 47' 50"; 73° 22' 38" de longitud Oeste, con una extensión territorial de 916.445 km² (MARN-PNUD-GEF 2005). La población es de aproximadamente 24 millones de habitantes (Bevilacqua y Miranda 2002) con una tasa de crecimiento interanual de 2,2% (MARN-PNUD-GEF 2005).

El país presenta gran diversidad de suelos en cuanto a sus características físicas y químicas, cualidades y limitaciones, debido a la diversidad geológica del territorio, de paisajes, de relieve, de vegetación y de clima (MARN-PNUD-GEF 2005).

2.1.1 Vegetación

Existen 650 tipos de vegetación con alrededor de 15.000 especies vegetales superiores pertenecientes a las formaciones boscosas o arbóreas (bosques, bosques de galería o ribereños, manglares y morichales), formaciones arbustivas (matorrales, cardonales y espinares), formaciones herbáceas (sabanas altas e inundables) y las vegetaciones de los páramos altos andinos y los tepuyes guyaneses (Hüber 1997).

Aproximadamente el 50% del territorio venezolano está cubierto por bosques, de estos cerca del 90% se concentran al Sur del río Orinoco, en la Región de Guayana. La mayoría de estos bosques se encuentra en tierras bajas. Con base en imágenes satelitales se estimó en el país una cobertura boscosa de 427.000 km² para el año 1996 (Bevilacqua y Miranda 2002). Sin embargo, en las tierras al Norte del Orinoco, que concentran el 85% de la población nacional, los bosques han sido sometidos a fuertes presiones, como consecuencia del desarrollo de diferentes actividades económicas (MARN-PNUD-GEF 2005).

La mayor parte de la deforestación que ocurre en Venezuela se produce en áreas no protegidas y de manera ilegal, alcanzándose una tasa de deforestación anual de 1,1% a escala nacional (MARN-PNUD-GEF 2005). Se considera que las principales causas de la deforestación en el país son la expansión de la frontera agrícola, la tala ilegal en los bosques naturales, los asentamientos permanentes en áreas boscosas designadas para aprovechamiento maderable, la planificación deficiente de la minería y los incendios forestales (Bevilacqua y Miranda 2002).

2.1.2 Limitaciones y potencialidades de las tierras

Comerma y Paredes (1978) plantean que con base en las características de los suelos y de clima, el 44% de las tierras en Venezuela tiene como principal limitante el relieve; consecuentemente esta característica genera altos riesgos de erosión, el 32% presenta problemas de baja fertilidad, el 18% limitaciones de drenaje, el 4% limitaciones de disponibilidad de agua y aridez y sólo el 2% del territorio nacional posee tierras de buena calidad; las cuales pudieran ser ampliadas al 4% si se regaran las áreas con mayor potencial agrícola en las zonas secas y se drenaran algunas áreas con potencial productivo.

Se estima que al Norte del río Orinoco se dispone de alrededor de 2 millones de ha de tierras de buena calidad, con ligeras y moderadas limitaciones (Clases I y II por capacidad de uso) para la producción agrícola, las cuales representan el 4,2% del territorio nacional. Las tierras con severas restricciones (Clase III por capacidad de uso) representan el 7,6% de la superficie nacional, mientras que las apropiadas para cultivos en forma limitada o especial, son el 10,8%. En consecuencia, sólo el 22% del territorio nacional es apto para la actividad agrícola (MARN-PNUD-GEF 2005).

Las tierras aptas para el aprovechamiento pecuario y forestal constituyen el 57,8% del territorio, también al Norte del Orinoco, y otros tipos de tierras representan el 19,6% (MARN-PNUD-GEF 2005). La disponibilidad de tierras agrícolas en Venezuela establece que existen 34,5 millones de ha aptas para la agricultura y la ganadería; representando las primeras el 21% (plantaciones, horticultura, fruticultura, agricultura de subsistencia) y las segundas el 79% (ganadería extensiva, semi-intensiva e intensiva) del total nacional (MARN-PNUD-GEF 2005).

2.1.3 Características generales de la actividad agrícola en Venezuela

La actividad agrícola en Venezuela demanda materiales genéticos de altos rendimientos, con uso intensivo de los suelos y el agua y es altamente dependiente de insumos tecnológicos, que han generado problemas de deterioro de los recursos naturales y contaminación ambiental (MARN-PNUD-GEF 2005).

Según cifras del VI Censo Agropecuario (MAC 1998) para el año 1997-1998, se estimó en el país una población de 95,1 millones de aves, 1,7 millones de cerdos, 13 millones de bovinos, 1,1 millones de caprinos, 700 mil ovinos y 59 mil búfalos. De acuerdo a las cifras y por su amplitud, se destaca el predominio de los sistemas de producción con rumiantes sobre el resto de los sistemas de producción animal. Sin embargo, las potencialidades naturales contrastan con la baja productividad por unidad de superficie; lo que presiona por la ampliación de la frontera agrícola a expensas de la deforestación de amplias áreas boscosas. La fragilidad de los ecosistemas y las implicaciones que se derivan de su utilización, constituyen un tema de creciente preocupación en diferentes ámbitos (Escobar 1998).

Los sistemas de producción con rumiantes en Venezuela presentan bajos niveles productivos y reproductivos, que en gran medida, son consecuencia de las limitaciones climáticas, edáficas y nutricionales (Escobar 1998).

2.2 Sistemas de ganadería de doble propósito

Un sistema de producción de ganadería doble propósito (GDP) es aquel donde existe la producción simultánea de leche vendible y carne proveniente de los machos (becerros, mautes o novillos) y hembras (becerras, mautas, novillas o vacas) de descarte. Este término no tiene especificaciones del nivel de intensidad, el genotipo del animal o las prácticas de manejo usadas (Vaccaro y López 1995).

2.2.1 Importancia de los sistemas de ganadería de doble propósito

Se considera que en la región tropical de América, los sistemas de GDP contribuyen con el 41% de la leche y 78% de la carne producidas. En estos sistemas de producción, la más importante fuente de alimentos para los animales son las pasturas de gramíneas nativas e introducidas, las cuales presentan limitaciones en cantidad y calidad de la biomasa, fundamentalmente en época seca. En consecuencia, la producción de leche (2 a 4 L vaca⁻¹ día⁻¹) y la eficiencia reproductiva (50-60%) de los hatos son bajas (Lascano et ál. 1997).

En Venezuela, los sistemas GDP generan más del 90% del total de la leche y el 45% de la carne bovina producida (Plasse 1992, Fundación GDP 2002). Se estima que para el año 1999 el rebaño bovino de Venezuela estaba conformado por 13.773.376 cabezas, divididos en dos grandes grupos: uno de ganadería de leche o rebaño de ordeño, que representa el 33,8% del total y constituido en un 90% por un rebaño de doble propósito y un 10% con animales puros o mestizos con alta participación de razas lecheras. El segundo grupo, de ganadería de carne, lo conforma el 66,2% de la población total (MARN-PNUD-GEF 2005).

2.2.2 Impacto ambiental y social de la ganadería en América Latina

En la actualidad, en América Tropical el mayor uso de la tierra de los agroecosistemas corresponde a pasturas, y se estima que en algunos países puede ocupar entre el 60% y 80% del territorio total (Murgueitio e Ibrahim 2008). Durante los últimos años, en el trópico americano se han presentado incrementos en la producción de leche y carne bovina. Sin embargo, se considera que estos aumentos son debidos al crecimiento de la población bovina y del área de pastoreo a expensas de la disminución de ecosistemas naturales, especialmente de bosques (Pezo e Ibrahim 1999) y de montaña y en menor proporción, de humedales y zonas costeras (Murgueitio e Ibrahim 2008).

Además, la productividad de estos agroecosistemas presenta bajo crecimiento como consecuencia de la implementación de sistemas extensivos de producción y de la incorporación de suelos de menor fertilidad a la actividad productiva (Pezo e Ibrahim 1999). Esta productividad expresada en baja carga animal, bajos índices de producción por animal y

por hectárea, reducida contribución a la capitalización y al empleo rural (Murgueitio e Ibrahim 2008).

La producción agrícola, incluyendo la ganadería, está basada en recursos naturales tales como tierra, agua, aire y plantas. Los sistemas de producción ganadera presentan diferentes interfases con la naturaleza. En algunas regiones se aprecia una degradación inducida por la pobreza, la cual, está relacionada con la baja productividad expresada en forma de deforestación y sobrepastoreo. También, hay contaminación y agotamiento nutricional, derivado de grandes transferencias de nutrientes, asociadas con formas de producción ganadera intensivas (Steinfeld 2000).

Al respecto, Camero (1995) señala que a partir de la segunda mitad del siglo XX se evidenció en las regiones tropicales, un marcado incremento en el deterioro de los recursos naturales y el ambiente, lo cual compromete la sostenibilidad de los ecosistemas. Murgueitio et ál. (1999) señalan que las actividades pecuarias, además de su conexión directa con la tala y quema de bosques, también genera otros impactos ambientales negativos, como la degradación del suelo; uniformidad genética de grandes extensiones del territorio al promoverse el monocultivo de gramíneas, a través de quemadas estacionales y eliminación de la sucesión vegetal por medios químicos o físicos; desecación de humedales; construcción de vías de penetración; demanda de madera para construcción de cercas y corrales y contaminación del agua y el suelo por el uso de agroquímicos.

Aproximadamente el 57% de los bosques tropicales del mundo se encuentran en América Latina. Sin embargo, se estima una tasa de deforestación en la región superior al 1% anual. Esta fuerte tendencia a la tala de bosques en las regiones tropicales, es consecuencia de un aumento en la demanda por el uso de la tierra, asociada con el aumento demográfico, mayores presiones económicas para intensificar la producción agrícola, uso inadecuado de los recursos naturales y una mayor demanda por el uso de los mismos (Montagnini 1992).

Murgueitio e Ibrahim (2008) señalan que la elevada tasa de deforestación en los países tropicales genera efectos locales como la degradación de suelos y la disminución de su

productividad, a escala regional ocasiona reducción en la capacidad de regulación hídrica y contaminación de ríos. Globalmente incide en la pérdida de la biodiversidad al disminuir los ecosistemas de bosques neotropicales, caracterizados por su alta riqueza de especies de la flora y fauna. De igual manera, el cambio de uso de la tierra hacia pasturas contribuye con emisiones de GEI hacia la atmósfera.

2.3 Ciclo del carbono

Los diferentes procesos de bloqueo de la síntesis y descomposición por los cuales el carbono es difundido en el suelo, plantas, animales y el aire, en conjunto la biosfera, comprende el ciclo del carbono (Figura 1; White 2006). Este ciclo es dinámico y continuo, y consiste en el intercambio de carbono en forma de CO₂ entre la atmósfera, los combustibles fósiles, los océanos, la vegetación y los suelos de los ecosistemas terrestres (FAO 2000). El ciclo terrestre del carbono involucra varios reservorios (océanos, biosfera y atmósfera) y permanece en un balance relativo. Sin embargo, perturbaciones humanas relativamente pequeñas pueden tener efectos muy grandes sobre él (Falkowski et ál. 2000).

Las actividades humanas adicionan CO₂ a la atmósfera con la extracción y consumo de combustibles fósiles y la conversión de bosques a pastizales, cultivos y otros usos de la tierra de baja producción de biomasa. Como resultado, el carbono orgánico de rocas, organismos y suelos, que normalmente permanece aislado del ciclo por largos períodos, es liberado a la atmósfera como CO₂ (Falkowski et ál. 2000). Esto ha conducido a un aumento estable de la concentración de CO₂ en la atmósfera, a una tasa anual de 0,4%, incrementando el efecto de invernadero en el planeta (White 2006).

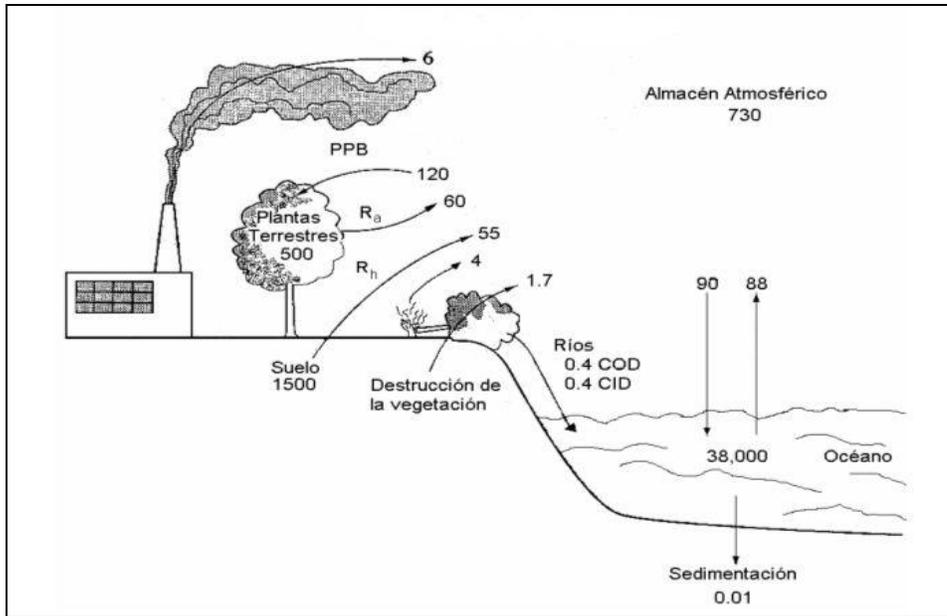


Figura 1. Representación esquemática del ciclo terrestre del carbono

2.3.1 La materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo (MOS) se origina a partir de los restos de las plantas, residuos de animales y excretas depositados sobre la superficie, que luego son mezclados en forma variable con los componentes minerales. La materia orgánica muerta es colonizada por organismos del suelo, principalmente microorganismos, que mediante la oxidación de las moléculas orgánicas derivan energía para su crecimiento (White 2006).

La combinación de materia orgánica viva y muerta, independientemente de su fuente o estado de descomposición es llamada materia orgánica del suelo (White 2006). La MOS está compuesta por componentes orgánicos, de los cuales los principales son los polisacáridos, proteínas, polifenoles, lignina, lípidos polímeros alifáticos y productos de la descomposición de éstos (Wattel-Koekkoek 2002). Por lo general, la biomasa del suelo usualmente contribuye con menos del 5% del total de la MOS (Schroth et ál. 2003).

Durante la descomposición de la MOS los elementos minerales son convertidos a formas inorgánicas simples, mediante el proceso de mineralización. Por ejemplo, compuestos

orgánicos de N, P y S aparecen como NH_4^+ , H_2PO_4^- y SO_4^{2-} , iones, y aproximadamente la mitad del carbono es liberado como CO_2 . El resto del carbono es incorporado por los microorganismos en su sustancia celular o biomasa microbiana, junto con una proporción variable de otros elementos esenciales, tales como N, P y S. Los residuos de los organismos, junto con las partes más recalcitrantes del sustrato original se acumulan en el suelo (White 2006).

Aunque la MOS forma un pequeño pool como reservorio de carbono, ella juega un papel esencial en el ciclo global del carbono. Debido al gran flujo de carbono que ingresa en la atmósfera cuando el suelo orgánico es descompuesto, la MOS es la principal fuente o sumidero para el carbón atmosférico (Wattel-Koekkoek 2002).

2.3.2 Importancia de la materia orgánica del suelo

La MOS es una fuente importante de nutrientes para las plantas. Cuando los microorganismos mineralizan la MOS, el CO_2 y nutrientes como el N, P, S y Ca son liberados. Además, la MOS incrementa la capacidad para absorber agua. También, mejora la estabilidad estructural del suelo, formando agregados con componentes minerales. Adicionalmente, estos contienen reactivos carbonyl, carboxyl y grupos hydroxyl, que influyen la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC) (Zech et ál. 1997).

2.3.3 Factores que determinan el contenido de materia orgánica del suelo

La cantidad de MOS en un suelo es una función de producción y descomposición. El ingreso anual de residuos de plantas y animales al suelo tiene grandes variaciones de acuerdo a las condiciones del clima de la región, el tipo de vegetación y el uso de la tierra (White 2006). La velocidad de mineralización de la MOS depende ante todo de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno, el uso de la tierra, los sistemas de cultivo, el manejo del suelo y de los cultivos (Lal 2005).

Wattel-Koekkoek (2002) señala que diferentes factores determinan el contenido de MOS, entre ellos:

- a. Clima. El contenido de MOS aumenta con la precipitación y disminuye en forma exponencial negativa con el incremento de la temperatura.
- b. pH del suelo. Bajo condiciones de acidez la actividad microbiana es relativamente baja, y la existencia de carbono se incrementa bajo pH decreciente.
- c. Nivel de nutrientes. En un ecosistema, el P y N total del suelo muestran una correlación positiva con el carbono total almacenado.
- d. Disponibilidad de oxígeno. En un ambiente anaeróbico el carbono se acumula porque la mayor parte de los microorganismos necesitan oxígeno mientras descomponen la MOS.
- e. Cantidad y calidad de hojarasca. Componentes como los biopolímeros aromáticos y alifáticos son relativamente recalcitrantes con respecto a la descomposición. La presencia de especies de plantas con altos contenidos de moléculas recalcitrantes pueden ocasionar un relativo alto contenido de MOS.
- f. Textura del suelo. En general, suelos con un alto contenido de arcilla presentan alto contenido de MOS. La arcilla puede ayudar a formar agregados en los que la MOS es protegida de la descomposición microbiana, y la arcilla químicamente une la MOS.

2.3.4 Efecto de las actividades antropógenas sobre el ciclo del carbono

Las perturbaciones causadas por el hombre al ciclo del carbono son directas e indirectas. Efectos directos claros son la adición de nuevo carbono al ciclo mundial del carbono activo mediante la quema de combustibles fósiles y la modificación de la estructura y distribución de la vegetación por medio del cambio de uso de la tierra (Apps 2003). La deforestación es una de las actividades que produce mayores efectos en el ciclo del carbono mediante la pérdida de capacidad fotosintética debido a la disminución de la masa vegetal y la liberación simultánea de grandes cantidades de carbono acumuladas en los bosques durante largos períodos de tiempo (Apps 2003, White 2006).

La expansión de las áreas cultivadas con arroz y el incremento de los rebaños de rumiantes ha contribuido al aumento en las emisiones de CH₄ y un mayor uso de fertilizantes nitrogenados a las emisiones de N₂O (White 2006). Los efectos indirectos causados por el

hombre en el ciclo del carbono también producen cambios en otros ciclos mundiales biogeoquímicos importantes, altera la composición atmosférica por medio de la adición de contaminantes, así como de CO₂, y cambios en la biodiversidad de paisajes y especies (Apps 2003).

En la actualidad, aproximadamente las tres cuartas partes de las perturbaciones directas causadas por el hombre el ciclo mundial del carbono se deben a la quema de combustible fósil, cuyas emisiones superan 6 Gt C año⁻¹. Sin embargo, desde mediados del siglo XIX la adición acumulativa de CO₂ antropogénico a la atmósfera por cambios en la utilización de la tierra ha sido tan elevada (aproximadamente 156 Gt C), como la ocasionada por el uso de combustible fósil (aproximadamente 280 Gt C) y continúa siendo una importante emisión antropógena (aproximadamente 2,2 Gt C año⁻¹; Hugthon 2003).

2.4 El efecto invernadero

El efecto invernadero es un fenómeno natural que se produce en la tierra. El vapor de agua y gases como CO₂, CH₄, N₂O y los clorofluorocarbonos (CFC), son transparentes a la radiación solar de onda corta que ingresa a la atmósfera, pero absorben la radiación de onda larga emitida por la superficie de la tierra. La absorción de esta energía en la troposfera, atrapa el calor que de otra manera sería irradiado al espacio. El efecto neto es beneficioso para la vida en la tierra, porque en ausencia de este efecto aislante, la temperatura promedio podría ser 30 °C más baja que la temperatura normal (White 2006).

Los incrementos en las emisiones de gases, principalmente de CO₂, CH₄ y N₂O debido a las actividades antropogénicas desde la Revolución Industrial en el Siglo XVIII, han incidido notablemente en el efecto invernadero (White 2006). El CO₂ es uno de los gases cuyas concentraciones atmosféricas se han alterado como consecuencia de las actividades humanas. Actualmente, la concentración atmosférica de CO₂ es de aproximadamente 370 ppmv, esto es 35% más elevada que en los últimos 420.000 años anteriores, y producto de las perturbaciones causadas por el hombre al ciclo mundial del carbono. Esta concentración está aumentando en una tasa que es al menos 10, y tal vez 100 veces mayor, de lo que se había observado anteriormente (Falkowski et ál. 2000).

2.4.1 Incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera

Los cambios en el clima de la tierra son producidos como consecuencia de la variabilidad interna del sistema climático y de factores externos, tanto naturales como antropógenos. La influencia de diversos factores externos en el clima permite hacer comparaciones mediante el concepto de forzamiento radiativo (IPCC 2001a).

El forzamiento radiativo es un índice que permite medir la influencia que ejerce un factor en la modificación del equilibrio entre la energía que ingresa y la que sale en el sistema tierra-atmósfera. Este índice refleja la importancia del factor como mecanismo potencial del cambio climático (IPCC 2001a). La contribución de un elemento o compuesto al forzamiento radiativo del cambio climático depende de las propiedades moleculares del gas, del incremento de su concentración y del tiempo de residencia de dicho elemento en la atmósfera, una vez emitido (IPCC 2001a).

Como se indicó, a partir de la era industrial, las concentraciones de GEI en la atmósfera han aumentado considerablemente debido a las actividades humanas. En el Cuadro 1 se presentan los parámetros técnicos y la evolución histórica de la concentración de algunos GEI desde el año 1750 hasta 1999.

Debido a que los GEI presentan diferente capacidad para capturar las radiaciones térmicas en la atmósfera, se ha desarrollado el concepto de Potencial de Calentamiento Global (PCG) para calcular la contribución de un determinado gas al calentamiento global (IPCC 2001a). El PCG es un índice que aproxima el efecto de calentamiento en el tiempo de una masa unitaria de un determinado gas de efecto invernadero en la atmósfera actual, en relación con la del CO₂ (IPCC 2001a).

Cuadro 1. Evolución histórica e incremento estimado de la concentración de tres gases de efecto invernadero.

Gas	Concentración		Variación (%)	TVA (años)	TCC	FR (Wm ²)
	Preindustrial	1999				
CO ₂ (ppm)	280	367	31	5-100	1,5	1,46
CH ₄ (ppb)	700	1745	150	12	7,0	0,48
N ₂ O (ppb)	270	314	16	114	0,8	0,15

Donde: TVA: Tiempo de vida en la atmósfera, TCC: Ritmo de cambio de la concentración por año (1990-1999) y FR: Forzamiento radiativo.

Fuente: IPCC 2001a

Los valores de PCG para el CO₂, CH₄, y N₂O son 1, 23 y 310, respectivamente. Estos valores representan el potencial de calentamiento de cada gas con respecto al CO₂. El PCG se utiliza para transformar los valores de concentración de estos gases a CO₂ equivalentes y facilitar la comparación (IPCC 2001a).

2.4.2 Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas ganaderos

Según el IPCC (2006) las emisiones de GEI en los sistemas ganaderos se deben principalmente a las siguientes categorías de fuentes:

- Emisiones de CH₄ procedentes de la fermentación entérica del ganado bovino.
- Emisiones de CH₄ y N₂O procedentes del manejo del estiércol.
- Emisiones directas de N₂O procedentes del manejo del suelo.
- Emisiones de CO₂ procedentes de la utilización de combustibles fósiles debido al uso de maquinaria y equipo agrícola en la finca.
- Emisiones de CO₂ procedentes de los cambios de uso de la tierra.

2.4.3 Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas

Para estimar la emisión de CH₄ por el ganado se han formulado diferentes modelos matemáticos (Wilkerson et ál. 1995), y diferentes métodos de medición fueron reseñados por Johnson y Johnson (1995). El software *Livestock Feeding Strategies Simulation Models*

(Modelo *LIFE-SIM, Dairy* v.8.0) desarrollado por la División de Manejo de Recursos Naturales del Centro Internacional de la Papa (CIP) es un modelo bioeconómico compuesto por seis módulos de entrada: animal, condiciones ambientales, pastos y forrajes, suplementos, estrategias de alimentación y costos (León-Velarde et ál. 2006).

El modelo *LIFE-SIM* permite predecir los cambios en producción animal a lo largo de un período de tiempo de hasta un año en función de las variaciones en las estrategias de alimentación aplicadas (León-Velarde et ál. 2006). Para el uso del modelo *LIFE-SIM* se requiere información a un alto nivel detalle; en la que se puede incluir la curva de lactancia de bovinos, y además, es un modelo probabilístico que permite simular los escenarios propuestos reiteradamente para obtener los valores promedio.

El modelo *LIFE-SIM*, además de estimar las emisiones de CH₄ de origen entérico, determina la cantidad de excretas producidas por los animales y el contenido de nitrógeno en éstas (León-Velarde et ál. 2006).

2.4.4 Factores asociados al incremento de la concentración atmosférica de los principales gases de efecto invernadero

2.4.4.1 Dióxido de carbono

El CO₂ es el principal gas desde el punto de vista del calentamiento global debido al volumen generado, el cual ha tenido un ritmo de aumento de 1,5 ppm año⁻¹; incrementando su concentración, y por el tiempo de residencia en la atmósfera (IPCC 2001a).

La composición isotópica del CO₂ y la disminución observada en el oxígeno (O₂) demuestran que el aumento del CO₂ en la atmósfera, se debe principalmente a la oxidación de carbono orgánico por la quema de combustibles de origen fósil y cambios de uso de la tierra; aportando éstas aproximadamente el 70 y 30% de las emisiones, respectivamente (IPCC

2001a). El carbono se está acumulando en la atmósfera a una tasa de $3,5 \text{ Pg}^5 \text{ año}^{-1}$ (Albrecht y Kandji 2003).

El área mundial de bosques está disminuyendo aproximadamente entre 12 y 15 millones de ha por año, la mayor parte de ellas (10 a 12 millones de ha) ocurre en el trópico; mientras que el área de bosques en las regiones templadas y boreales ha aumentado levemente durante las últimas décadas. Las principales causas de la deforestación en los trópicos son el cambio de tierras agrícolas hacia tierras de pastoreo, y la tala de madera para leña y para construcción (Kanninen 2000).

Palm et ál. (2004) señalan que la deforestación en áreas tropicales contribuye con un 25% del flujo neto de emisiones de CO_2 , principalmente de la tumba y quema de la biomasa presente en la vegetación y de la descomposición de la MOS. Así mismo, la degradación de pasturas contribuye de manera importante al aumento del CO_2 atmosférico, ya que en estos sistemas hay una rápida descomposición del carbono de la materia orgánica, lo cual, favorece una mayor emisión (Houghton 2003).

2.4.4.2 Metano

Por su potencial de calentamiento el CH_4 constituye el segundo gas en importancia en el cambio global, después del CO_2 . Las fuentes más importantes de emisión de CH_4 son la descomposición de la materia orgánica, los sistemas energéticos que utilizan gas y petróleo, las minas de carbón, el tratamiento de aguas residuales, las industrias y el sector agrícola (Reid et ál. 2004).

En el sector agropecuario las fuentes de CH_4 en los trópicos son las emisiones entéricas de los rumiantes, el estiércol de los animales y la producción de arroz. La fermentación ruminal y estiércol contribuyen con el 23% y 7%, respectivamente, de las emisiones de todas las fuentes antropógenas (IPCC 2001a, O'Hara et ál. 2003) y contribuyen al 30% del potencial

⁵ 1 Pg = 10^{15} g o billones de t.

de calentamiento global de todas las emisiones de la agricultura y al 5% del calentamiento potencial global de todas las fuentes antropógenas (Reid et ál. 2004).

Por las características de su sistema digestivo, los rumiantes tienen la capacidad de aprovechar y convertir el material fibroso en alimentos de alto valor nutritivo, como la carne y la leche. Sin embargo, también emiten CH_4 (Montenegro y Abarca 2000). Los rumiantes emiten CH_4 por la acción de los microorganismos del rumen durante el proceso de digestión. Así mismo, el nivel de producción de CH_4 está directamente relacionado con la calidad de la dieta del animal. Por lo tanto, el consumo de forrajes tropicales conlleva a altas tasas de producción de CH_4 de los animales, comparándolos con animales en clima templado o consumiendo dietas altas en granos (Reid et ál. 2004).

Los rumiantes pierden aproximadamente el 6% de la energía ingerida en forma de CH_4 eructado (Johnson y Johnson 1995). Sin embargo, con forrajes de baja calidad la emisión de CH_4 en bovinos podría representar entre 15% y 18% de la energía digestible (Montenegro y Abarca 2000). En condiciones de trópico húmedo y subhúmedo, donde prevalecen forrajes de mediana a baja calidad y el nivel de producción es bajo, las emisiones de CH_4 por unidad de producto tienden a ser altas (Steinfeld 2000). Así, Reid et ál. (2004) señalan que dietas en condiciones tropicales pueden producir 3,5 veces más CH_4 por unidad de producto que dietas en clima templado.

A nivel ruminal se consideran dos mecanismos que determinan la variación en la producción de CH_4 . El primero es la cantidad de carbohidratos de la dieta fermentados en el rumen. Este mecanismo tiene amplia relación con las interacciones que determinan el balance entre las tasas de fermentación y pasaje de los carbohidratos (Wolin y Millar, citados por Johnson y Johnson 1995).

El segundo mecanismo, determina la disponibilidad de hidrógeno y consecuentemente la producción de CH_4 por medio de la proporción de ácidos grasos volátiles en el rumen. Las fracciones ácido propiónico y ácido acético tienen un mayor impacto sobre la producción de CH_4 . Si la relación ácido acético: ácido propiónico es 0,5; las pérdidas de energía del

sustrato en forma de CH_4 serán 0. Si todo el carbohidrato es fermentado a ácido acético y no se produce ácido propiónico, las pérdidas de energía como CH_4 pueden ser del 33% (Wolin y Millar, citados por Johnson y Johnson 1995).

Los factores que determinan la producción de CH_4 a nivel ruminal fueron ampliamente discutidos por Johnson y Johnson (1995). Entre ellos están el consumo de alimento, tipo de carbohidratos en la dieta, valor nutritivo del alimento, procesamiento del forraje, adición de lípidos y manipulación de la microflora ruminal, incluyendo la adición de ionoforos. Estudios realizados en Brasil por Abreu et ál. (2004), demostraron que las emisiones de CH_4 en ganado lechero varían con la dieta, la raza y estado fisiológico de los animales.

Mora (2001) en fincas lecheras en una zona de bosque húmedo montano bajo en Costa Rica, obtuvo niveles de emisión de CH_4 en vacas lactantes entre 388 y 470 g día⁻¹ y una relación de emisión entre 23,5 y 27,2 g CH_4 kg⁻¹ de leche producido. Las mayores emisiones de CH_4 correspondieron a fincas de alto uso de insumos y los menores a fincas de bajo uso de insumos y con sistemas silvopastoriles. Sin embargo, la mayor relación de emisión de CH_4 correspondió a las fincas de alto uso de insumos y alta producción de leche.

2.4.4.3 Óxido nitroso

El N_2O contribuye en un 6% al efecto de calentamiento global, pero el aporte dentro del sector agrícola es de 16% (Dalal et ál. 2003). Esto evidencia la importancia que tienen las actividades del sector agropecuario en las emisiones globales de N_2O . La concentración atmosférica de N_2O se está incrementando a una tasa de 0,22% por año, este gas presenta una larga vida en la atmósfera y un potencial de calentamiento global 310 veces mayor que el CO_2 ; y además, se considera que es responsable de la destrucción del ozono de la estratosfera (Bhatia et ál. 2004).

Las fuentes antropógenas más importantes de N_2O son las heces y orina de los animales, aguas residuales de explotaciones ganaderas y fertilizantes nitrogenados aplicados a las pasturas y cultivos (O'Hara et ál. 2003, Reid et ál. 2004). También, los cambios de uso de la

tierra y el efecto de los cambios de temperatura (Reid et ál. 2004). Sin embargo, estos mismos autores, señalan que el uso de estiércol (como abono) y fertilizantes químicos por su relativo bajo uso, son poco importantes en algunas tierras de pastoreo del trópico.

Según el IPCC (2006), las emisiones de N_2O pueden ser directas e indirectas. Las emisiones directas se producen por aplicaciones de N a los suelos y las indirectas por volatilización de NH_3 y NO_x por el manejo del suelo, por la quema de combustibles fósiles y la quema de biomasa. Desde la perspectiva agrícola, las emisiones de N_2O del suelo, representan pérdidas del sistema y disminución en la eficiencia de uso del nitrógeno (N). El suelo es considerado la fuente más importante de emisiones, contribuyendo con un 65% del total global. La emisión anual de N_2O de sistemas agrícolas es de $6,3 \text{ Tg}^6$, e incluye las emisiones de suelos agrícolas y sistemas de producción animal a sistemas acuáticos y a la atmósfera (Bhatia et ál. 2004).

En Australia, Dalal et ál. (2003) reportaron una emisión total de $60,92 \text{ kt N año}^{-1}$, de los cuales el 78,7% y 2,3% corresponde a las actividades y cambios de uso de la tierra, respectivamente. De igual manera, señalan que las principales actividades relacionadas con estas emisiones son el uso de fertilizantes químicos, labranza del suelo y rotación de pasturas con leguminosas, excreciones de animales y quemadas de pasturas y sabanas.

El N_2O es producido en el suelo principalmente por los microorganismos durante los procesos de nitrificación y denitrificación. La relación de producción de N_2O a N_2 depende de la suplenia de oxígeno o agua en el espacio poroso, descomposición del carbono orgánico, nitrógeno presente en el sustrato, pH y salinidad del suelo (Dalal et ál. 2003).

⁶ 1 Tg = 10^{12} g o millones de t.

2.5 El cambio climático y su relación con las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector agropecuario

2.5.1 Efectos esperados del cambio climático

El cambio climático es un problema con efectos negativos importantes a nivel global y se considera que puede durar mucho tiempo, incluso siglos (IPCC 2001b). Como consecuencias del cambio climático, se prevé un aumento medio del nivel del mar de 9 a 88 cm para el año 2100, lo cual ocasionará la inundación de las zonas costeras; otros efectos podrían inducir aumentos en las precipitaciones a nivel global y cambios en la severidad y frecuencia de eventos extremos. Las zonas climáticas podrían sufrir un movimiento hacia los polos, lo que significaría una distorsión de bosques, desiertos, praderas y otros ecosistemas. En consecuencia, algunos de estos ecosistemas se verían reducidos o fragmentados y se prevé la extinción de muchas especies de la flora y la fauna.

2.5.2 Opciones para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector agropecuario

Las opciones de mitigación del cambio climático pueden aportar beneficios sociales, económicos y ambientales. Además, de las reducciones de CO₂ en la atmósfera. No obstante, su aplicación inadecuada puede causar riesgos de efectos negativos (IPCC 2001b).

Desde el punto de vista biológico se consideran tres tipos de actividades a través de las cuales se puede reducir el carbono en la atmósfera: a) conservación de los reservorios de carbono existentes, b) secuestro de carbono mediante el aumento de los reservorios y c) sustitución por productos biológicos, generados de manera sostenible (IPCC 2001b).

La conservación de reservorios de carbono puede contribuir a evitar emisiones, si se impiden los escapes y sólo puede resultar sostenible si es posible abordar las causas socioeconómicas de la deforestación y otras pérdidas de reservorios. El secuestro de carbono refleja la dinámica biológica del crecimiento, que puede comenzar lentamente, llegar

a un máximo y luego disminuye a lo largo del tiempo. La sustitución es viable mediante el uso de la madera como material de construcción y la biomasa vegetal para generar sustitutos de combustibles fósiles (IPCC 2001b). Se estima que las mayores posibilidades biológicas para la mitigación del carbono en la atmósfera están en las regiones subtropicales y tropicales. Los costos estimados de la mitigación varían notablemente, desde US\$ 0,1 t C a US\$ 20 t C, aproximadamente en varios países tropicales y de US\$ 20 t C a US\$ 100 t C en regiones de clima templado (IPCC 2001b).

Preston y Leng (1989), bajo una visión agroecosistémica, consideran que en condiciones tropicales se pueden manejar diferentes opciones tecnológicas que contribuyan a reducir las emisiones de GEI. Entre ellas, el uso de cultivos perennes (caña de azúcar, árboles forrajeros y palmas), la suplementación estratégica de los animales, el reemplazo gradual del pastoreo por la estabulación, el aprovechamiento de los residuos de cosecha y la utilización de biodigestores plásticos de flujo continuo para el aprovechamiento de los residuos de las granjas.

En el sector agrícola son reconocidas diversas prácticas que contribuyen a disminuir las emisiones de GEI. Entre ellas, la labranza reducida; la incorporación de residuos de cosecha al suelo; el uso de abonos verdes; rotación con cultivos de leguminosas; uso de coberturas (Dixon 1995a); manejo del agua (riego y drenaje); optimización de la aplicación de fertilizantes orgánicos para lograr un uso más eficiente por las plantas; manipulación de la dieta de los rumiantes para reducir la emisión de CH₄; mejora del balance de nitrógeno en la dieta de los animales para reducir su pérdida por excreciones; y manejo de los efluentes procedentes de las explotaciones pecuarias (O'Hara et ál. 2003)

2.5.3 Contribución de los sistemas agroforestales al secuestro de carbono

La agroforestería es una estrategia de amplia importancia en el secuestro de carbono porque presenta un alto potencial de almacenamiento en múltiples especies de plantas y en el suelo, así como por su aplicabilidad en tierras agrícolas y en reforestación (Montagnini y Nair 2004). En este sentido, el rol de la agroforestería en el flujo y almacenamiento de carbono a largo plazo en la biosfera ha incrementado el interés de esta opción de uso de la tierra para

estabilizar las emisiones de GEI (Dixon 1995b).

Dixon (1995b) señala que los sistemas agroforestales (SAF) pueden ser manejados para ayudar a estabilizar las emisiones de GEI mediante: a) el secuestro de CO₂ en las plantas y almacenamiento de carbono y nitrógeno en especies perennes y suelo, b) producción sostenible de alimentos, combustible y fibras para ayudar a reducir la deforestación y degradación del suelo y c) producción de bio-combustibles que puedan sustituir las fuentes fósiles.

Los SAF podrían remover cantidades significativas de carbono de la atmósfera, ya que las especies arbóreas lo pueden retener por un tiempo prolongado, principalmente en su madera (Albrecht y Kandji 2003). Diversas prácticas agroforestales se han implementado y evaluado en más de 50 países, demostrando la disponibilidad de opciones viables para reducir las emisiones de GEI y conservar y/o secuestrar carbono en los ecosistemas terrestres. A escala global, los SAF podrían ser establecidos en 585 a 1.275 millones de ha, y potencialmente almacenarían de 12 a 228 Mg C ha⁻¹, incluyendo el carbono del suelo (Dixon 1995b).

Sin embargo, Dixon (1995b) señala que el establecimiento y manejo de SAF no compatibles con las condiciones de suelo y clima pueden contribuir a incrementar las emisiones de GEI del sistema. El cambio de uso de la tierra, de bosque o pastura a agricultura intensiva resulta generalmente en la disminución del carbono en el suelo, debido al incremento en las tasas de descomposición de la MOS y respiración microbial. Por el contrario, la labranza conservacionista y el establecimiento de SAF pueden incrementar la acumulación de carbono (Dixon 1995a).

Albrecht y Kandji (2003) afirman que la cantidad de carbono removido en un SAF depende del tipo de sistema desarrollado, la estructura y la función; y en mayor grado, es determinada por factores ambientales y socioeconómicos. Aunque, también deben ser considerados, las especies arbóreas a utilizar y su manejo.

2.6 Importancia de los sistemas silvopastoriles en la producción ganadera

Los sistemas silvopastoriles (SSP) constituyen una modalidad de la agroforestería y son una opción de producción ganadera que involucra la presencia de árboles y arbustos en interacción con pastos y animales en el mismo espacio, bajo un sistema de manejo integral (Pezo e Ibrahim 1996, Murgueitio e Ibrahim 2008).

La combinación de especies de árboles con pastos y animales se puede presentar de diversas formas, lo que ha propiciado la identificación y clasificación en diferentes SSP. Entre los SSP que se pueden desarrollar en una finca están las cercas vivas, bancos forrajeros, pasturas en callejones de leñosas, pasturas con árboles y/o arbustos dispersos, pastoreo en plantaciones de árboles maderables o frutales y cortinas rompevientos (Pezo e Ibrahim 1996). Las asociaciones de árboles con pastos, pueden ser con gramíneas nativas o con gramíneas mejoradas o introducidas.

La incorporación de los árboles en los sistemas ganaderos trae diversos beneficios, entre ellos (Pezo e Ibrahim 1996):

- a. Contribuye a contrarrestar impactos ambientales negativos de los sistemas de producción.
- b. Favorecen la restauración ecológica en áreas de pasturas degradadas.
- c. Constituyen una alternativa para la diversificación de las fincas, generando productos e ingresos adicionales.
- d. Contribuyen a reducir el uso de insumos externos.
- e. Permiten intensificar el uso del recurso suelo, sin reducir su potencial productivo a largo plazo.

Diferentes estudios han demostrado que es viable la agregación de valores económicos y sociales al reconvertir la ganadería bajo SSP y ordenamiento del territorio, de tal manera que se generan externalidades ambientales positivas que deben ser reconocidas por la sociedad (Murgueitio e Ibrahim 2008).

Los SSP pueden contribuir significativamente a incrementar los aportes económicos y sociales de los sistemas ganaderos. Estos pueden tener, además de la actividad pecuaria, otros usos complementarios como la producción de madera y frutos; la mejora del microclima, hábitat para la fauna silvestre, regulación hídrica en cuencas hidrográficas y además, embellecen el paisaje (Murgueitio e Ibrahim 2008).

2.6.1 Principios para el desarrollo de los sistemas silvopastoriles

Para el desarrollo de los SSP deben ser considerados diferentes principios ecológicos, con aplicaciones y desarrollos propios de acuerdo con las condiciones específicas de cada agroecosistema, contextos sociales, culturales y económicos que estén en interacción con éstos (Murgueitio et ál. 1999). Estos principios han sido discutidos por Murgueitio et ál. (1999), los mismos se resumen en:

- a. Incremento de la diversidad vegetal en los distintos sistemas de producción pecuaria.
- b. Reducción de los impactos negativos sobre los suelos ocasionados por la disminución de la biomasa vegetal. La alta eficiencia biológica de los ecosistemas tropicales es posible al aprovechamiento de la energía solar por las plantas. Las pérdidas de la biomasa vegetal disminuye la eficiencia de los sistemas; estas son ocasionadas principalmente por cambios estacionales, quemas, aplicación de herbicidas, sobrepastoreo y plagas. Es posible minimizar las prácticas antrópicas que afectan la biomasa vegetal, mediante la cultura de no quemar, control mecánico y selectivo de las plantas no deseables y ajuste de la carga animal en las tierras de pastoreo.
- c. Reducción de los efectos del pisoteo de los animales en los suelos. El pisoteo de los animales sobre el suelo ocasiona compactación, reducción de la infiltración hídrica, deterioro de la estructura original y pérdida o exceso de algunos nutrientes. La presencia de árboles y arbustos contribuyen a mejorar las condiciones físicas del suelo.
- d. Aumento de la complejidad estructural de la vegetación a través de dos o más estratos regulados mediante podas selectivas. El aumento de la diversidad y complejidad estructural de especies permite incrementar la producción por unidad de área, maximizar los efectos benéficos sobre el suelo y obtener una mayor diversidad de productos con fines de obtener forraje, medicina, madera y leña.
- e. Incremento del reciclaje de nutrientes a través de la introducción de árboles y arbustos. El incremento del reciclaje de nutrientes puede realizarse a través de la optimización del

- pastoreo, la introducción de árboles y arbustos que fijen nitrógeno, movilicen el fósforo inmovilizado por aniones; incrementan la circulación de otros elementos de las capas más profundas del suelo y mejoran la actividad biológica a través de los aportes de hojarasca. En sistemas de corte y acarreo, la distribución de excretas de animales, permiten mantener y en algunos casos incrementar la fertilidad de los suelos. Si los árboles utilizados en el sistema son leguminosas o de otras especies que pueden fijar nitrógeno, contribuyen a mejorar la fertilidad del suelo, como también lo hacen las leguminosas forrajeras asociadas con pasturas en estos sistemas de producción. Así mismo, puede presentarse la posibilidad de incrementarse, a largo plazo, la fertilidad del suelo como resultado de la presencia de animales pastoreando gramíneas y leguminosas asociadas.
- f. Reducción de la temperatura ambiental durante la época seca. La reducción de los extremos de temperatura ambiental durante la época seca y/o del efecto desecante del viento puede realizarse a través de la vegetación arbórea y arbustiva; lo cual contribuye al bienestar animal y a la actividad biológica de los suelos.
 - g. Disminución del impacto erosivo de las lluvias y regulación del ciclo hídrico local. El incremento de la cobertura del suelo con gramíneas o leguminosas estoloníferas y el mayor número de estratos en la vegetación en los sistemas agroforestales, disminuyen las pérdidas por lixiviación y conservan los nutrientes y la materia orgánica en el suelo. Un beneficio directo es la prevención de impactos negativos en ecosistemas acuáticos, ya que se reduce la cantidad de sedimentos que fluyen hacia los ríos.
 - h. Integración con otros sistemas de producción. La integración con otros sistemas de producción como plantaciones forestales, avicultura, porcicultura, cultivos agroindustriales (caña de azúcar, musáceas, palmas aceiteras, cacao, soya, cítricos) o alimentarios (yuca, ocumo, maíz, frijol, frutales), incrementa la sostenibilidad del sistema; ya que se pueden obtener subproductos para alimentar a los animales y/o aportar nutrientes al suelo, además de generar un ambiente más estable para los diferentes componentes biológicos.

Con la aplicación de los principios señalados, es posible incrementar la eficiencia biológica y económica de los sistemas de producción animal en el ámbito regional, con ventajas ambientales de interés global; tales como la reducción de la deforestación, captura de carbono, incremento de la cobertura vegetal y reducción de la erosión y conservación del agua en las cuencas hidrográficas.

2.6.2 Potencial de los sistemas silvopastoriles en el secuestro de carbono

Los SSP en el trópico presentan un gran potencial para contribuir en la mitigación del calentamiento global, ya que la combinación de especies C_3 y C_4 actúa como un sumidero eficiente de carbono (Montenegro y Abarca 2000).

La producción y los servicios ofertados por los SSP se efectúan a través de numerosas y complejas interacciones biofísicas. La naturaleza e intensidad de estas interacciones dependen del espacio y del tiempo. A nivel del sistema, el impacto de estas interacciones biofísicas sobre la producción y servicios ofertados, como producción arbórea, ganadera, biodiversidad, hábitat de la fauna, fertilidad del suelo, competencia por recursos, captura energética a diferentes niveles tróficos, modificaciones microclimáticas, secuestro de carbono y calidad estética, también pueden cambiar en el espacio y tiempo (Gordon et ál. 2004).

López et ál. (1999) en la Zona Atlántica de Costa Rica, en un suelo Typic Tropofluent de fertilidad media encontró un almacenamiento de 233 Mg C ha^{-1} en los primeros 50 cm de suelo cuando el uso de la tierra era un pastizal puro de pasto guinea *Panicum maximum*. Mientras que en un SSP de laurel *Cordia alliodora* de regeneración natural y diferentes edades, en pastizales de *P. maximum*, el carbono acumulado varió entre $180\text{-}200 \text{ Mg ha}^{-1}$ dependiendo de la edad de los árboles. La variabilidad de la distribución del C aumentó con la profundidad del suelo y con la edad de los árboles.

Arias et ál. (2001) estudiaron en una zona de Bosque Seco Tropical en Venezuela, el almacenamiento y fijación de carbono en un sistema de cultivos en callejones de mata ratón *Gliricidia sepium* y yuca *Manihot esculenta* y un sistema de pasturas en callejones de *G. sepium*, leucaena *Leucaena leucocephala* y pasto estrella *Cynodon nlemfuensis* (SSPg_{lc}). En el primero se determinó un almacenamiento de $653 \text{ kg de C ha}^{-1}$ y una fijación de $327 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Mientras que en el SSPg_{lc} se cuantificó un almacenamiento de 309 kg C ha^{-1} y una tasa de fijación de $123,6 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El COS (hasta 10 cm de profundidad) en el sistema de pasturas en callejones se estimó en $13,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y en el sistema *G. sepium* - *M. esculenta* fue de $12,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización y descripción del área de estudio

El estudio se realizó en el Modelo Físico de Agricultura Tropical Sostenible (MF-ATS), el cual es una finca integral experimental, que inició su funcionamiento desde el año 1998, en la sede de la Fundación Danac ubicada a 10°21'45'' de latitud Norte, 68°39'00'' de longitud Oeste y a 100 m.s.n.m, en San Javier, Municipio San Felipe, Estado Yaracuy, República Bolivariana de Venezuela (Figura 2, Anexo 1).

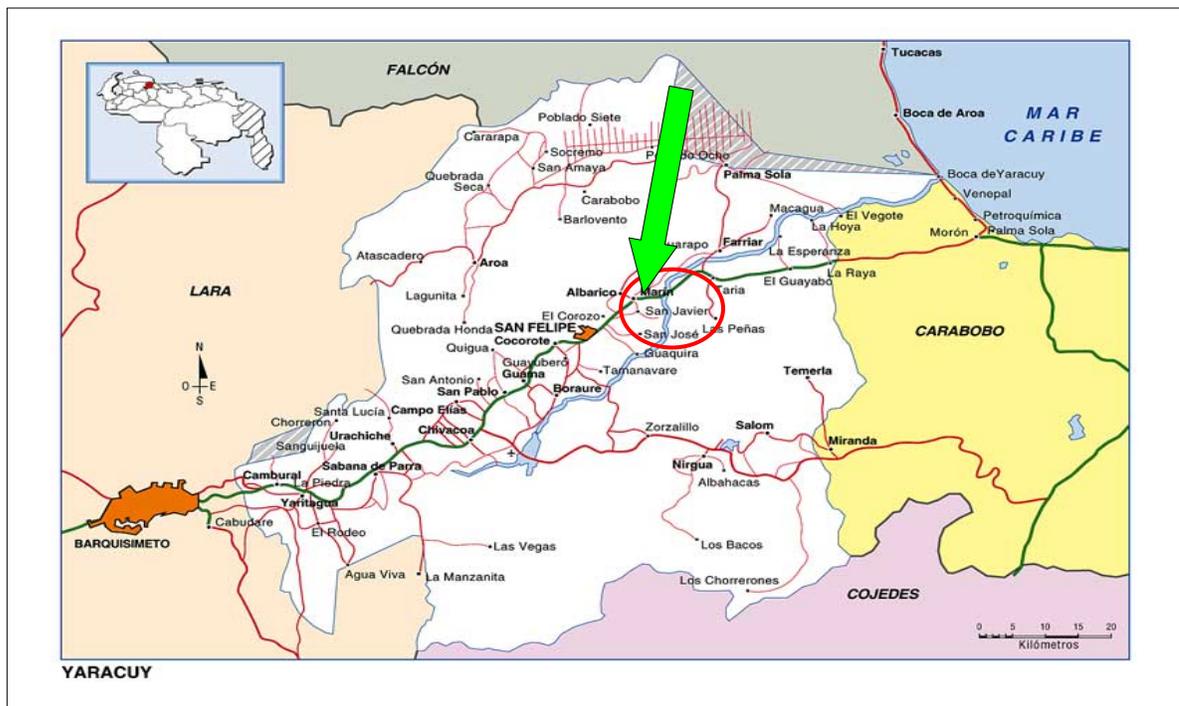


Figura 2. Localización del sitio de estudio, San Javier, Estado Yaracuy, Venezuela

Actualmente, denominado Modelo de Granja Integral Sostenible “Aguiles Escobar Boves”, el MF-ATS forma parte del Programa de Agricultura Tropical Sostenible (ATS) promovido, de manera conjunta, por Fundación Danac y Fundación Empresas Polar (FEP), con el apoyo técnico de la Facultad de Agronomía (FAGRO) de la Universidad Central de Venezuela (UCV).

Concebido bajo un enfoque de sistemas, inicialmente el MF-ATS fue dividido en cuatro subsistemas: bovinos doble propósito, cerdos, espacio doméstico rural y barbacoas (subsistema para la producción de hortalizas a pequeña escala, Escobar et ál. 2000). Actualmente, lo conforman los subsistemas bovinos doble propósito, cerdos, espacio doméstico rural; cada uno con una serie de componentes propios y otros compartidos, en los cuales se presentan interacciones propias de los sistemas de producción agropecuaria (Añez, 2007).

El MF-ATS presta diferentes funciones y servicios relacionados entre sí. Entre ellos están: unidad de producción integrada o finca integral, unidad demostrativa, de capacitación y de transferencia de tecnologías y unidad de investigación y de apoyo a la formación de capital humano.

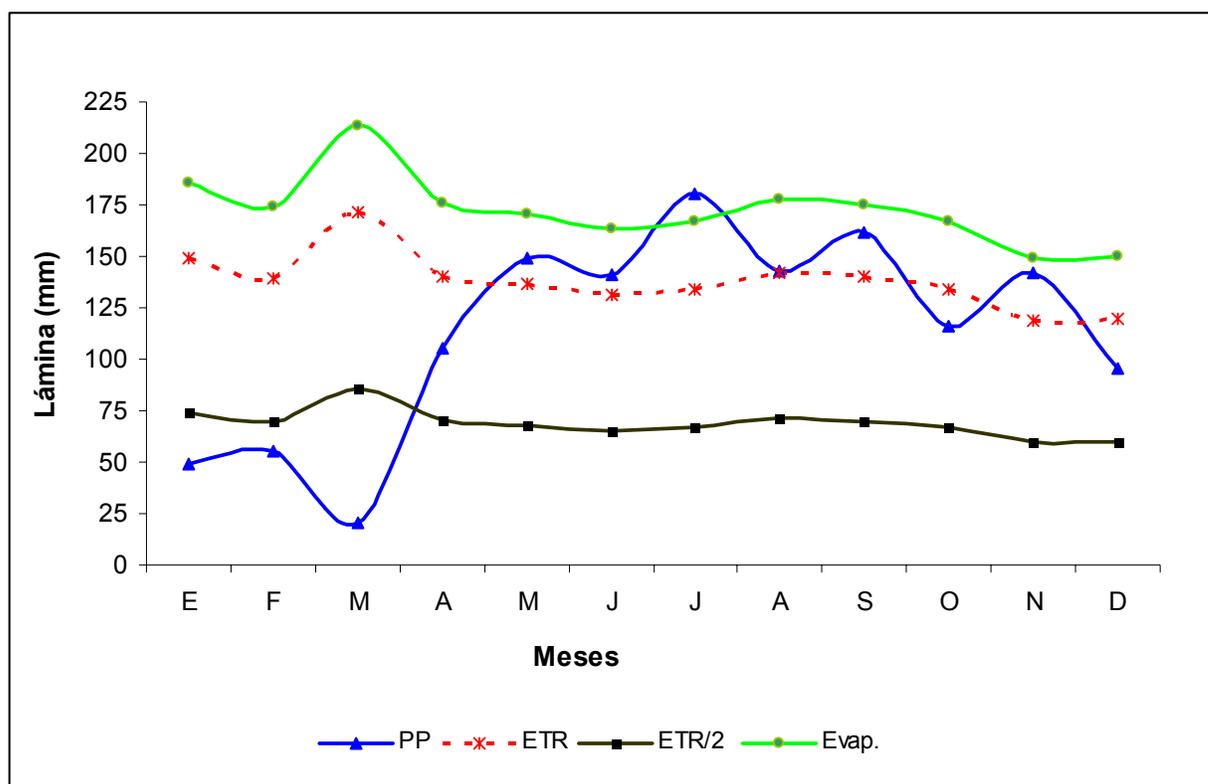
3.1.1 Condiciones biofísicas

El área de estudio se ubica en la Provincia Fisiográfica de la Cordillera de la Costa, al Norte de Venezuela; específicamente en la región natural depresión del Yaracuy, la cual conforma un valle tectónico alargado y disimétrico que presenta un relieve bajo la forma de un gran plano inclinado o glacis de explayamiento, orientado hacia el río Yaracuy, con predominio de dos tipos de paisajes, piedemonte y el del valle del Yaracuy (Torres y Madero 1999).

Las formaciones vegetales presentes en los tramos alto y medio de la depresión del Yaracuy, están constituidas por vegetación natural de bosques semidecuidos y deciduos, mientras que en el tramo inferior predomina vegetación natural de bosques semidecuidos y siempre verdes, alterna con bosques deciduos (Ewel et ál. 1976). La mayor parte de la superficie de la depresión ha sido deforestada para establecer pasturas, cultivos anuales y cultivos semi-permanentes con riego (Torres y Madero 1999).

La zona de vida, según la clasificación de Holdridge (2000), corresponde a una zona de Bosque Seco Tropical. Sin embargo, Torres y Madero (1999), consideran que pertenece a una zona de transición entre el Bosque Seco Tropical y el Bosque Húmedo Tropical.

Con base en los registros para el período 1988-2005 de la Estación Climatológica Naranjal (Fundación Danac 2006), en San Javier se presenta una temperatura media anual de 26 °C, con promedios anuales de máxima y mínima de 31 y 22 °C, respectivamente. La precipitación media anual es de 1359 mm, con un período lluvioso entre mayo y noviembre que concentra el 76% del agua caída y un período de sequía entre diciembre y abril, y la evaporación media anual es de 2070 mm (Figura 3). La humedad relativa promedio anual es de 83% con una variación mensual de $\pm 1,6 \%$.



Donde: PP= precipitación, ETR= evapotranspiración de referencia, ETR/2= evapotranspiración de referencia media y Evap.= evaporación.

Figura 3. Climadiagrama de San Javier, estado Yaracuy, Venezuela (Período 1988-2005).

Fuente: Estación Climatológica Naranjal (10°21'45"N; 68°39'00"O; 107 m de altitud.) - Convenio Fundación Danac – MARN.

De acuerdo con Torres y Madero (1999), el balance hídrico del área de influencia de la Estación Climatológica Naranjal, presenta un período de seis meses (junio – noviembre) en el que los suelos están húmedos y los restantes seis meses (diciembre – mayo) en el que

están secos. Para efectos de los cálculos relacionados con las emisiones de GEI se tomó en consideración esta distribución de las épocas del año.

El sitio de estudio se ubica en un paisaje de planicie aluvial, con topografía plana a suavemente ondulada sobre una terraza alta, sin afloramientos rocosos ni pedregosidad. La formación geológica corresponde a depósitos coluviales y aluviales, con predominio de esquistos micáceos, gneiss y cuarcitas derivadas principalmente de las formaciones “Las Brisas” y “Yaritagua” (Torres y Madero 1999, UCV 1999). Los suelos del MF-ATS fueron clasificados en los órdenes Alfisoles e Inceptisoles, según Soil Survey Staff (1998) por Torres y Madero (1999) y Rey et ál. (2005).

En el estudio conducido por Torres y Madero (1999), la ubicación de la calicata para la descripción del perfil de suelo fue el potrero 3 del MF-ATS y correspondió a las coordenadas 10° 21'45"N y 68°39'00"O, en este caso el suelo fue clasificado como Vertic Haplustalf. Rey et ál. (2005), describieron los perfiles de suelo de cinco calicatas excavadas en cada uno de los TUT seleccionados para este estudio, clasificándolos en los órdenes Inceptisoles y Alfisoles, con los regimenes de humedad acuico y ustico (Soil Survey Staff 1998;Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación taxonómica de suelos del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela

TUT	Clasificación taxonómica	Orden	Régimen de humedad
BP	Aeric Fragiuaquepts Ff, mixta, isohipertérmica	Inceptisol	Acuico
PCL	Typic Haplustalfs Ff, mixta, isohipertérmica	Alfisol	Ustico
BF	Aquic Haplustepts Fg, mixta, isohipertérmica	Inceptisol	Ustico
CAZ	Typic Endoaqualfs Af, mixta, isohipertérmica	Alfisol	Acuico
PAD	Chromic Vertic Endoaqualfs Af, mixta, isohipertérmica	Alfisol	Acuico

Donde: BP= bosque primario, PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar, PAD= pastura con árboles dispersos.

Fuente: Rey et ál. 2005.

Los suelos predominantes en el MF-ATS presentan limitaciones de profundidad efectiva y exceso de humedad durante la época lluviosa (Zambrano 1986); debido a la presencia de

una capa de suelo con carácter de fragipán, la cual reduce la profundidad efectiva en un ámbito de 15 a 20 cm. Además, presentan baja conductividad hidráulica, alta vulnerabilidad y riesgo a procesos de degradación estructural que pueden ocasionar sellado, encostramiento, compactación y erosión por escorrentía superficial (UCV 1999). El fragipán es una capa subsuperficial muy densa, ligeramente a muy impermeable, frágil o quebradiza en húmedo, pero dura a muy dura en seco. Sus fragmentos secos al aire se deshacen cuando se agitan en agua durante 15 horas (Mata 2003).

Los suelos del MF-ATS son ligeramente ácidos a fuertemente ácidos, sin problemas de salinidad y moderada fertilidad química derivada de la disponibilidad de nutrientes. Con alta disponibilidad de K y Mg, baja a alta de Ca y P y bajo contenido de materia orgánica; lo que limita la disponibilidad de N (UCV 1999; Cuadro 3).

Cuadro 3. Características químicas de los suelos del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Uso	pH (1:1)	CE (dS m ⁻¹) ^a	MO (%)	P	Ca	K	Na	Mg
1	5,57	0,16	0,91	48	942	104	60	276
2	6,02	0,05	0,77	108	1192	215	14	176
3	5,70	0,32	1,65	110	1302	122	42	246
4 ^b	5,19	0,23	1,11	44	282	90	9	91
4 ^c	5,15	0,20	1,28	26	416	66	28	114

Donde: Valores expresados hasta 15 cm de profundidad. Los usos de la tierra están referidos a los señalados en el Cuadro 4. ^a deciSiemens por metro. ^b Potrero I (asociación pasto-*Leucaena leucocephala*). ^c Potrero II (asociación pasto-*Gliciridia sepium*).

Fuente: UCV 1999.

3.1.2 Tipos de uso de la tierra en el MF-ATS

El MF-ATS inicialmente abarcaba 16 ha (1998) y en la actualidad ocupa aproximadamente 23 ha dedicadas a la producción agropecuaria y a la conservación de los recursos naturales. Limita al Norte con un fragmento de bosque primario, al Sur con un bosque de galería y la quebrada Naranjal, afluente del río Yaracuy. Al Este y Oeste limita con áreas destinadas al

proyecto Bosque Multiespecífico y campos experimentales para mejoramiento genético de maíz y arroz de la Fundación Danac, respectivamente. La distribución de los tipos de usos de la tierra (TUT) del MF-ATS se presenta en el Cuadro 4 y Anexo 1.

Cuadro 4. Tipos de uso de la tierra en el Modelo Físico de Agricultura Tropical Sostenible, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Tipo de uso de la tierra		Edad ^a (años)	Superficie (ha)
1	Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	8	1,7
2	Pasto de corte (<i>Pennisetum purpureum</i>) ^b	0	0,3
3	Bancos forrajeros (mata ratón <i>G. sepium</i> , nacedero <i>Trichantera gigantea</i> , morera <i>Morus</i> spp.)	5 - 8	1,1
4	Cultivos en rotación (yuca <i>M. esculenta</i> , soya <i>Glicine max</i> , canavalia <i>Cannavalia ensiformis</i> , frijol <i>Vigna unguiculata</i> , sorgo <i>Sorghum vulgare</i>)	8	1,0
5	Pasturas en callejones de <i>G. sepium</i> y <i>L. leucocephala</i>	5 - 8	10,0
6	Palmas aceiteras (palma africana <i>Elaeis guineensis</i> , pejibaye <i>Batris gasipaes</i> , corozo <i>Acrocomia aculeata</i>) ^c	8	
7	Espacio doméstico rural, instalaciones para animales, procesamiento de productos, biodigestor, estanques de plantas acuáticas ^d y vivero.	8	1,0
8	Pastura mejorada con árboles dispersos	ND	3,3
9	Sistema silvopastoril multiestrata ^e	2 - 3	4,4
10	Colección de totumos (<i>Crescentia cujete</i>)	6	0,1
Total			22,9

Donde: ^a Edad calculada para el año 2005. En los casos que se indican dos edades se debe a diferencias en cuanto al año de establecimiento de los componentes en el sistema respectivo. ^b En proceso de establecimiento en el año 2005. ^c Establecidas en siembras lineales en linderos y a orillas de la vía de acceso. ^d *Lemna minor* y *Azolla filiculoides*. ^e En establecimiento para el momento del estudio. ND: No determinado

3.2 Tipos de usos de la tierra evaluados

El estudio se condujo durante el período enero - septiembre de 2005 y se seleccionaron cuatro TUT del MF-ATS a saber: pastura en callejones de *L. leucocephala* (PCL), banco forrajero de *G. sepium* (BF), cultivo de caña de azúcar *S. officinarum* (CAZ), pastura mejorada con árboles dispersos (PAD) y rotación de cultivos (ROT) estos componentes se vinculan con el subsistema bovinos doble propósito. También, se seleccionó un fragmento de bosque primario (BP) aledaño a la finca, el cual constituyó un control positivo para el estudio.

3.2.1 Historia de manejo y caracterización de los tipos de uso de la tierra bajo estudio

Desde el año 1990 hasta 1995, parte de los suelos que actualmente corresponden al MF-ATS fueron utilizados para establecer parcelas con ensayos de mejoramiento genético de maíz en investigaciones conducidas por la Fundación Danac. Estos suelos fueron sometidos a prácticas de labranza convencional; basadas fundamentalmente en labores de volteo con rastra pesada y desterronado con rastra liviana. Se aplicaron fertilizantes químicos de acuerdo a análisis de suelos y requerimientos de los cultivos y pesticidas para el control de plagas (Zocco, J.L. com. personal). En el resto del área, con cobertura de gramíneas y otras especies herbáceas, se aplicó control mecánico en forma periódica a las malezas presentes.

Posteriormente, al iniciarse el establecimiento del MF-ATS a finales del año 1996 y durante 1997 se realizaron labores de labranza convencional para el establecimiento de los cultivos y las pasturas de acuerdo a la zonificación de áreas establecida para la finca. En general, se considera que a partir del establecimiento del MF-ATS se han reducido las labores de labranza de los suelos del área; excepto en el TUT ROT, esto debido a que son cultivos de ciclo anual. Sin embargo, el área bajo este uso sólo representa alrededor de un 8 % de la superficie total de la finca. De igual manera, las actividades agrícolas se han desarrollado bajo el criterio de reducido uso de insumos externos y con la incorporación de abonos orgánicos y coberturas al suelo. A continuación se describen los aspectos de mayor importancia de los tipos de usos de la tierra bajo evaluación y su historia de manejo.

3.2.1.1 Bosque primario

El área bajo el TUT BP corresponde a un fragmento de bosque natural ubicado en los terrenos de la Fundación Danac y al Norte del MF-ATS, abarca una superficie estimada de 22 ha. Este bosque ha estado sometido a baja intervención antropogénica, ya que ocasionalmente se han extraído algunos árboles caídos en forma natural para el aprovechamiento de la madera en el MF-ATS o en la Fundación Danac. Este aprovechamiento ocasional de la madera se ha realizado bajo el marco legal vigente en el país.

Por observaciones propias, se determinó que la caída de árboles en el bosque es ocasionada por vientos y lluvias fuertes que se presentan eventualmente, lo que propicia el volcamiento de los árboles de mayor tamaño. Lo anterior, puede estar asociado a las limitaciones de profundidad efectiva que presentan los suelos debido a la capa de fragipán que restringe el desarrollo de las raíces principales, y consecuentemente podría limitar la capacidad de anclaje de los árboles.

3.2.1.2 Sistema de pasturas en callejones

El sistema de pasturas en callejones de *L. leucocephala* y *G. sepium* abarca una superficie total de 10 ha, dividida en tres potreros (con superficie de 3,75 ha, 2,75 ha, y 3,50 ha, para los potreros I, II y III, respectivamente), establecidos desde el año 1997 y utilizados desde 1998 para el pastoreo de bovinos. Los potreros están divididos con cercas electrificadas en módulos (apartos) de 0,25 ha para un total de 40 módulos. En ellos se encuentran establecidos arbustos de *G. sepium* y *L. leucocephala* en hileras dobles separadas a 5 m y con una distancia entre hileras y entre plantas de 1 m (1m x 1m x 5m) para una densidad de siembra inicial de 3333 plantas ha⁻¹. Los pastos predominantes fueron estrella *Cynodon nlemfuensis*, guinea *Panicum maximum*, pará *Brachiaria mutica* y caribe *Eriochloa polystachia*, distribuidos en las diferentes posiciones fisiográficas del área.

El acondicionamiento de los suelos para el establecimiento del pasto y *G. sepium* se realizó

aplicando un pase de rastra pesada y tres de rastra liviana, luego se realizó un surco doble cada cinco metros para el trasplante de la leguminosa.

La leguminosa *G. sepium* fue establecida mediante semilla sexual colectada en la zona. Previamente, se conformaron viveros y posteriormente se realizó el trasplante a partir de los tres a cuatro meses de edad de las plantas. El pasto estrella se sembró luego de la leguminosa, mediante semilla vegetativa procedente de una finca cercana a Fundación Danac. Los pastos *P. maximum*, *B. mutica* y *Eriochloa polystachia* se establecieron por semilla vegetativa y/o plantas presentes en el área. Al año de establecidas las plantas de *G. sepium*, se podaron a un metro de altura (poda de formación), conformándolas como arbustos forrajeros de manera de facilitar la accesibilidad por parte de los bovinos.

En los potreros, algunas plantas de *G. sepium* se dejaron a libre crecimiento con la finalidad de mantenerlas como árboles de sombra para los animales. El pastoreo de los animales se inició en junio de 1998, un año después de la siembra de las gramíneas y el trasplante de *G. sepium*. A partir del período 1999-2000 se observó una disminución progresiva en la producción de biomasa y supervivencia de *G. sepium*. En este sentido, un estudio conducido por Fraute (2001) ratificó la presencia en el TUT PCL de una capa de suelo con características de fragipán con distribución continua, espesor entre 5,0 y 15,0 cm y profundidad de 5,0 a 30,0 cm en relación a la superficie del suelo; la cual se asoció a la baja productividad y supervivencia de la leguminosa.

En consecuencia, desde el año 1999-2000 se optó por establecer en las áreas afectadas *L. leucocephala*; reemplazando las plantas de *G. sepium* que presentaron limitaciones para su supervivencia. La elección de *L. Leucocephala* se debió a que esta planta se ha utilizado en otras regiones del país y es considerada de mayor rusticidad y tolerancia al ramoneo que *G. sepium* (Escobar, A. com. personal).

La siembra de *L. leucocephala* se realizó de manera similar a la de *G. sepium* y manteniendo el diseño inicial, con la diferencia de que al momento del trasplante ya estaba establecida la gramínea, por lo cual se limpió un platón en el punto de siembra y se realizaron controles

periódicos de las herbáceas en las dobles hileras para favorecer el desarrollo y establecimiento de *L. leucocephala*. Los potreros se mantuvieron aislados entre 8 y 10 meses para lograr el establecimiento de la leguminosa, luego ingresaron los animales. Debido a la introducción posterior de *L. leucocephala*, se presentan diferencias en cuanto a la edad de los pastos y la leguminosa (Cuadro 4).

En el sistema PCL se manejan las vacas y el toro (rebaño en producción) bajo pastoreo rotativo, con un tiempo de ocupación de 2 días y 74 de días de descanso y carga animal promedio de 2,2 a 2,5 UA ha⁻¹ (1 UA equivale a 450 kg PV). Sin embargo, en época de sequía y debido a la menor disponibilidad de forraje, el tiempo de ocupación se reduce a un día y consecuentemente el tiempo de descanso disminuye a 37 días.

A la salida de los animales de cada potrero se efectúa el control de malezas en forma manual (machete y desmalezadora) y los arbustos de *G. sepium* y *L. leucocephala* son podados periódicamente para mantener la altura de ramoneo (1 m). Durante los meses críticos de la época seca (enero-abril) se aplica riego a las pasturas.

La fertilización de la pastura se realiza a inicio de las lluvias con una mezcla de abono orgánico (compost) y urea a razón de 440 y 75 kg ha⁻¹, respectivamente. Para el estudio se seleccionó el potrero I (3,75 ha), ya que en el mismo se cumplió con la sustitución total de *L. leucocephala* por *G. sepium* y presentaba una mayor uniformidad en cuanto a la distribución de la arbustiva forrajera. Para este estudio se asumió que en toda el área (10 ha) prevalece *L. leucocephala*.

3.2.1.3 Banco forrajero de *Gliricidia sepium*

El banco forrajero corresponde a un área de 1,1 ha (lote 10 del MF-ATS), con una pendiente promedio de 12% en sentido Norte - Sur, en la que se estableció en el año 1997 un sistema agroforestal de cultivo en callejones (*Alley cropping*) en curvas de nivel, constituido por *G. sepium*, sembrada a 5 m entre hileras y a 0,6 m entre plantas, y *M. esculenta* sembrada en los callejones a 1 m x 1 m.

Para la siembra inicial, se volteo el suelo con arado de discos, luego se desterronó con rastra liviana y se dio un pase de surcadora en sentido contrario a la pendiente para realizar la siembra en curvas de nivel, las cuales fueron demarcadas previo a la realización de la labor mecanizada. Posteriormente, no se ha realizado ninguna labor de labranza en estos suelos. Luego de dos ciclos de producción, no se cultivó *M. esculenta* debido a que las condiciones físicas de los suelos limitaban su producción.

A partir del año 2000, con la finalidad de sustituir el cultivo de *M. esculenta*, se estableció un banco forrajero, mediante la siembra en los callejones de *G. sepium*, *T. gigantea* y *Morus* sp. Producto de este cambio de uso de la tierra se tienen plantas de *G. sepium* de diferentes edades, las establecidas inicialmente en 1997 y en el 2000, respectivamente (Cuadro 4).

El banco forrajero fue conformado de la siguiente manera:

- a. Lote 10-A (0,07 ha), banco de *G. sepium* sembrado a 5 m x 0,6 m y *T. gigantea* a 1 m x 0,6 m.
- b. Lote 10-B (0,508 ha), banco de *G. sepium* sembrado a 1 m x 0,6 m, con plantas de 5 y 8 años de edad.
- c. Lote 10 C (0,356 ha), *G. sepium* sembrado a 5 m x 0,6 m en el año 1997.
- d. Lote 10 D (0,170 ha), banco múltiple multiestrato, constituido por *G. sepium* en hileras distanciadas a 5 m x 0,6 m entre plantas, con *T. gigantea* y *Morus* sp. establecidas a 1 m x 0,6 m en los callejones.

Las plantas de *G. sepium* fueron establecidas con semilla sexual colectada en la zona y las plantas de *T. gigantea* y *Morus* sp. se propagaron por semilla vegetativa. Las tres especies se establecieron en vivero y a partir de los tres a cuatro meses de edad se realizó el trasplante al inicio del período de lluvias, para lo cual se hicieron hoyos de 0,4 x 0,2 m en los que se colocó abono orgánico a razón de 2 kg por planta.

A efectos del estudio, se seleccionó el lote 10-B del MF-ATS por ocupar una mayor superficie y presentar una sola especie arbustiva forrajera, correspondiendo al banco de *G. sepium* con plantas de 5 y 8 años de edad. Para este estudio se asume que las condiciones

del resto del banco forrajero son similares a las del lote 10-B.

El banco forrajero de *G. sepium* es manejado bajo corte y acarreo. El forraje es utilizado para la suplementación de vacas en producción y terneros, mediante consumo fresco, ensilaje y para la elaboración de bloques multinutricionales con harina obtenida del follaje deshidratado al sol durante dos a tres días. Las plantas se podan cada 3 a 4 meses, a una altura aproximada de 1,5 m y los tallos son distribuidos entre las hileras de la leguminosa; aportando al suelo cobertura, barreras para el control de la erosión y materia orgánica. El control de malezas se realiza en forma manual con machete y desmalezadora de 3 a 4 veces al año, antes de la poda de los arbustos. En esta área no se aplican abonos químicos, solo los residuos orgánicos generados por las podas.

3.2.1.4 Caña de azúcar

El TUT CAZ abarca un área de 1,7 ha, con una pendiente de 0,5 a 1% en sentido Oeste - Este. En el año 1997 se establecieron 2 ha de *S. officinarum* de las variedades comerciales Barbados 75403 y Canal Point 721210 procedentes del banco de germoplasma de caña de azúcar del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) del Estado Yaracuy. Para la siembra de la caña de azúcar se acondicionó el suelo aplicando labranza profunda mediante subsolado, luego un pase de arado de discos y desterronado con dos pases de rastra liviana. Posteriormente, se surcó y se demarcaron las zanjas para riego y drenaje. Desde la siembra del cultivo no se ha aplicado ninguna labor de labranza; solo se utiliza maquinaria agrícola (tractor) para el transporte de la caña de azúcar cosechada.

La biomasa aérea producida por el cultivo se utiliza para alimentación animal. De acuerdo con Murgueitio et ál. (2003), este sistema representa un banco forrajero para corte. La cosecha se realiza en forma manual y sin quema, y la planta se fracciona en tallo, cogollo y hojarasca. Lo anterior, permite la distribución de la biomasa para su utilización en la alimentación de bovinos aves y cerdos.

Los tallos se muelen en un trapiche de tres mazas para la extracción de jugo de caña para

alimentación de cerdos; el cogollo se suministra fresco a los bovinos y la hojarasca se deja en el suelo. Una parte de los tallos (2 a 3 kg BF día⁻¹) se repican para alimentación de aves de corral.

Posteriormente, la hojarasca es dispuesta en franjas en forma alterna entre las calles del cultivo y se utiliza como cobertura muerta con la finalidad de que contribuya al control de malezas, mantenga la humedad y aporte materia orgánica al suelo. Hasta el año 2003 se mantuvo como práctica de manejo del cultivo, la siembra en las calles libres de hojarasca, de *Crotalaria juncea*, la cual, se incorporaba posteriormente como abono verde.

A los 45 días después de la cosecha de la caña de azúcar se realiza el control de malezas en forma manual y se fertiliza utilizando una mezcla de 2,1 t de compost, 50 kg de urea y 40 kg de cloruro de potasio por hectárea, para un aporte total de 50 kg ha⁻¹ de N y K. En la época seca se aplica riego al cultivo. Para este estudio se seleccionaron los lotes 8A-1, 8B-1 y 8C-1, de 8 años de edad y establecidos con la variedad Canal Point 721210.

3.2.1.5 Pastura mejorada con árboles dispersos

Al inicio del establecimiento del MF-ATS, el TUT PAD se encontraba establecido y no era utilizado. Durante la época seca se aplicaban pases de rolo argentino para controlar la acumulación de biomasa madura del pasto y así evitar incendios de vegetación; que por lo general, se producen en la zona en esa época del año como consecuencia de la quema de la caña de azúcar para la cosecha en fincas cercanas.

El TUT PAD se ubica en una terraza baja con relieve plano a ondulado, abarca una superficie total de 3,35 ha y está dividido en dos potreros de 1,68 ha cada uno; comprende los potreros IV-A y IV-B del MF-ATS. La gramínea predominante es *P. maximum* y entre las especies arbóreas se destacan samán *Samanea saman*, guácimo *Guazuma ulmifolia*, carocaró *Enterolobium cyclocarpum* y tasajo *Pterocarpus officinallis*. De acuerdo a la especie de pasto y a la densidad arbórea, este sistema se clasifica como una pastura mejorada con alta densidad de árboles (> 30 árboles ha⁻¹; Murgueitio et ál. 2003).

Esta área se manejó bajo pastoreo desde el año 2000. Sin embargo, ya existía como pastura con árboles antes del establecimiento de la finca experimental en 1997. Información suministrada por habitantes de la comunidad de San Javier y trabajadores de Fundación Danac, permitió determinar que años atrás estas tierras formaron parte de una finca comercial y en este sitio se establecieron potreros.

Para el momento del estudio, este potrero se utilizaba para el pastoreo de animales en crecimiento, principalmente hembras de reemplazo, con una carga animal de 1,0 a 1,5 UA ha⁻¹, con tiempo de ocupación y descanso de 15±8 días y de 37±13 días, respectivamente. Se aplica control manual de malezas a entrada y salida de lluvias, combinado con un pase de rolo argentino una vez al año. Desde su incorporación como área de pastoreo del MF-ATS, esta pastura no se ha fertilizado ni se le ha aplicado ningún pesticida.

3.2.1.6 Rotación de cultivos

El acondicionamiento del suelo del área bajo cultivos en rotación se realizó aplicando un pase de rastra pesada y luego dos pases de rastra liviana. Estas labores se hacen en cada ciclo de cultivo, por lo que se considera que son los suelos con mayor índice de mecanización en la finca.

El área ocupa una superficie de una hectárea, con pendiente de 0,5% en sentido Oeste – Este. Se utiliza para la siembra de cultivos que son destinados para la elaboración de silajes para la alimentación de bovinos (*M. esculenta*, *C. ensiformis* y *S. vulgare*). Inicialmente se sembraron *G. max* y *V. unguiculata* para la producción de grano para la alimentación de los cerdos. Se aplicaron fertilizantes en dosis bajas y el control de malezas se realizó colocando coberturas muertas al suelo y mediante control mecánico con desmalezadora manual.

3.3 Variables evaluadas y diseño de muestreo en los tipos de uso de la tierra seleccionados

En los TUT BP, PCL, BF, CAZ y PAD se establecieron parcelas con la finalidad de determinar el carbono almacenado en los siguientes compartimientos:

- a. Carbono orgánico en el suelo hasta 1 m de profundidad.
- b. Carbono total almacenado en la biomasa aérea: árboles, arbustos, pasto y caña de azúcar.
- c. Carbono total almacenado en la necromasa sobre el suelo.
- d. También, se evaluaron parámetros físicos y químicos de los suelos bajo estudio, los cuales se describen posteriormente.

A efectos del presente estudio se consideró que la necromasa o detritos vegetales son la materia orgánica que reposa sobre la superficie del suelo y los árboles muertos en pie, generalmente en bajo estado de descomposición (MacDiken 1997). La necromasa la componen la hojarasca fina y detritos no finos o de madera gruesa (Herrera et ál. 2003). La primera está conformada por hojas, flores, frutos semillas y fragmentos de éstos, ramitas y material leñoso con diámetro máximo de 2 cm (Proctor citado por Herrera et ál. 2003). Los detritos de madera gruesa constituyen la masa vegetal muerta compuesta por trozos de madera, leños, troncos, ramas o árboles muertos en pie o caídos con diámetros ≥ 2 cm (Saldarriaga 1994).

3.3.1 Selección de las unidades de muestreo para el inventario de carbono

En este estudio la unidad de muestreo fue la parcela y el marco de muestreo fue toda el área del MF-ATS seleccionada para la evaluación. Para la selección de las parcelas en los TUT de tipo agrícola se realizó el reconocimiento de cada sistema; también se obtuvo información referida a superficie, cultivos, edad, gramíneas y especies arbóreas establecidas, densidad de siembra, diseño de los sistemas y manejo (carga animal, frecuencia de corte, labores mecanizadas, control de malezas, fertilización y riego), con esta información se definieron las áreas para establecer las parcelas. En el caso del BP se realizó un recorrido para el reconocimiento del área y selección de los sitios de establecimiento de las parcelas.

En la selección de las parcelas para el monitoreo de secuestro de carbono se tomó en consideración la distribución espacial de los árboles, tal como lo recomiendan Andrade e Ibrahim (2003). En cada TUT bajo estudio se seleccionaron al azar cuatro unidades experimentales (parcelas) siguiendo la metodología sugerida por Amézquita (2002) e incorporando algunas modificaciones de acuerdo a las condiciones de los suelos de cada TUT, para ello se contó con el apoyo de la Dra. Adriana Florentino (Profesora del Departamento de Edafología, FAGRO - UCV).

El muestreo fue estratificado, con cuatro repeticiones o parcelas. Las unidades de muestreo se establecieron alejadas de los bordes del TUT, mediante el trazado de un transepto en el sentido de la pendiente y en ellas se excavaron una calicata principal de 1 m³ y dos mini calicatas de 0,064 m³ (Figura 4).

La calicata principal se ubicó en el centro de la parcela y las dos mini calicatas a distancias alternas a ambos lados de la primera, una a 3 m y la otra a 6 m del centro. En la siguiente parcela, las distancias de las mini calicatas se invirtieron, es decir, 6 m cuando la anterior tenía 3 m y viceversa. De acuerdo con el diseño considerado, las unidades de muestreo del suelo coincidieron espacialmente con las parcelas donde se realizó el muestreo de los componentes relacionados con la biomasa aérea y la necromasa (Figura 4).

Las calicatas principales fueron georeferenciadas con un GPS Garmin eTrex® H (Garmin, Olathe, Kansas, US); para lo cual, se tomaron tres lecturas por punto y posteriormente se obtuvo el promedio de las lecturas efectuadas (Anexo 2). En el caso del bosque, debido al margen de error que podría generar la cobertura arbórea, se realizó un enlace con los puntos de muestreo mediante el uso de una brújula SUUNTO KB-14 (SUUNTO, Vaanta, FI) y cinta métrica.

Las profundidades de muestreo en el suelo fueron preestablecidas en: a) de 0 a 5 cm, b) de 5 a 20 cm, c) de 20 a 40 cm y d) de 40 a 100 cm. La exactitud en la medición de la profundidad se controló con una cinta métrica fijada en forma vertical al perfil del suelo.

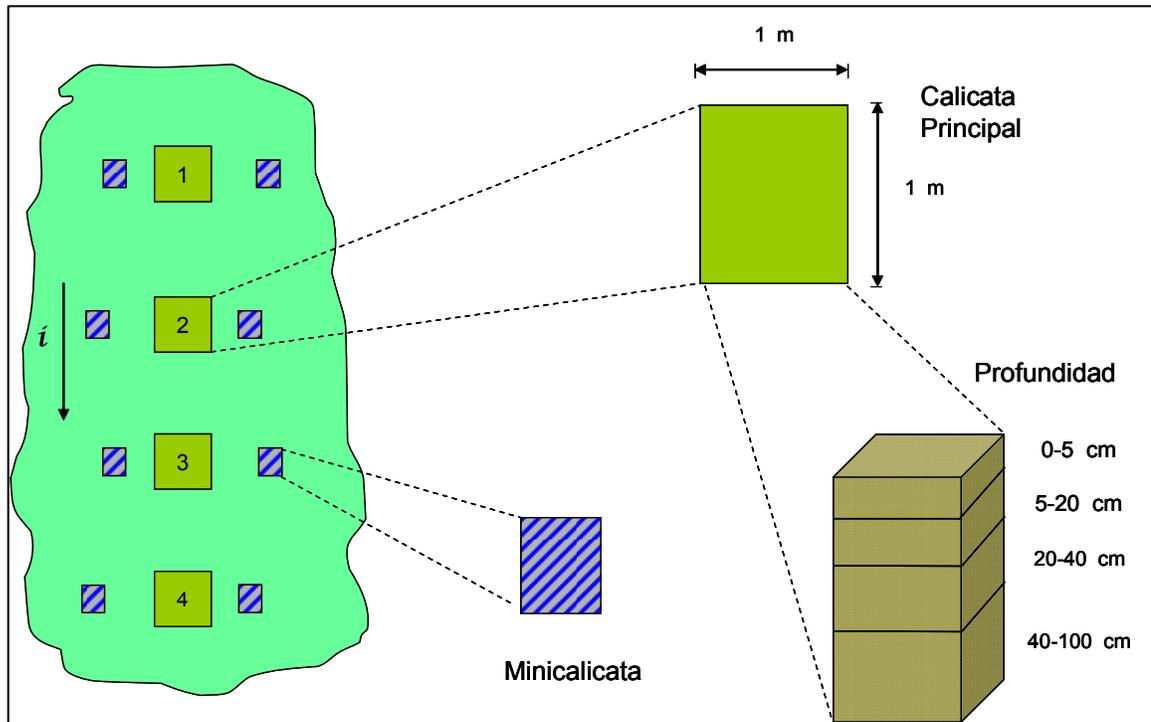


Figura 4. Representación esquemática del diseño del muestreo para el inventario de carbono por uso de la tierra.

Adaptado de Ibrahim et ál. 2007.

3.3.2 Evaluación de los parámetros físicos y químicos del suelo

El muestreo en el suelo se realizó de acuerdo al tipo de variables a evaluar, por lo que se tomaron muestras no alteradas o no disturbadas y muestras alteradas o disturbadas:

a. Muestras no alteradas

Siguiendo la metodología del “cilindro de volumen conocido” descrita por MacDicken (1997) se tomaron muestras no alteradas en la cara Norte de la calicata principal para determinar la densidad aparente. Con la utilización de un toma muestras tipo Ulhand con cilindros metálicos de aproximadamente 5 cm de diámetro y 5 cm de longitud (volumen = 98 cm³), se tomaron tres muestras en el tercio medio de cada profundidad establecida en el perfil del

suelo; excepto en el estrato de 0 a 5 cm, el cual debido a su espesor fue abarcado completamente por el cilindro.

Los cilindros, previamente identificados por punto de muestreo, fueron envueltos en papel de aluminio para mantenerlos inalterados y se almacenaron en cajas plásticas para su traslado al laboratorio. Se obtuvieron 48 muestras no disturbadas por cada TUT para un total de 240 muestras no disturbadas (5 TUT, 4 parcelas, 4 profundidades y 3 muestras por profundidad).

En cada profundidad del perfil del suelo se tomaron muestras compuestas de agregados de suelo (terrones de suelo) en la cara Norte de la calicata principal. Cada muestra fue de aproximadamente 500 g y se colocó en bolsas plásticas previamente rotuladas para su posterior identificación. Se obtuvieron 16 muestras por cada TUT para un total de 80 muestras de suelo (5 TUT, 4 repeticiones y 4 profundidades).

b. Muestras disgregadas

Las muestras disgregadas de suelo se tomaron raspando con cuchillo tres caras de la calicata principal y de las mini calicatas a las profundidades mencionadas. Las muestras de las mini calicatas se tomaron hasta los 40 cm raspando tres de las caras y desde allí hasta los 100 cm, utilizando un barreno.

Posteriormente, las muestras tomadas en igual cantidad por punto y profundidad de muestreo fueron colocadas en un recipiente plástico, se desmenuzaron y se mezclaron homogéneamente. Luego, se extrajo una muestra de suelo compuesta de aproximadamente 500 g, la cual se colocó en una bolsa plástica previamente rotulada. En este muestreo, se obtuvo igual número de muestras (80) que en el caso de los agregados.

3.3.3 Métodos analíticos

Los análisis químicos y de textura de las muestras de suelo fueron realizados en el laboratorio General de Suelos del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias

(CENIAP), INIA, en Maracay, Estado Aragua, Venezuela, siguiendo los métodos de rutina adoptados por este laboratorio (Gilabert de Brito et ál. 1990). Se determinó: textura por el método de Boyoucos, fósforo (P) por el método de Olsen, calcio (Ca) y magnesio (Mg) por el método de Morgan modificado, Potasio (K), reacción (pH) por el método potenciométrico, conductividad eléctrica (CE) por el método conductimétrico y capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Las determinaciones de carbono (C) total, nitrógeno (N) y azufre (S) se realizaron en el laboratorio de Microbiología de Suelos y en el laboratorio General de Suelos del CENIAP-INIA en Maracay, mediante la siguiente metodología:

- a. Las muestras de suelo se secaron en estufa de aire forzado a 80 °C durante 24 horas.
- b. Posteriormente, las muestras de suelo fueron maceradas en morteros para reducir el tamaño de los agregados, luego se tamizaron en una criba de 250 micras para eliminar piedras o partículas de arena.
- c. Después se tomaron sub-muestras de 300 mg de suelo. Cada sub-muestra fue colocada en un vial de 5 mL y se tapó herméticamente.
- d. Se determinó carbono total mediante la combustión directa de las sub-muestras de suelo (250 mg) en un analizador de gases LECO CNS-2000 (LECO, St. Joseph MI, US).

En este estudio debido a que no se observó reacción al HCl en los muestreos de campo y a la acidez del suelo (Torres y Madero 1999, Rey et ál. 2005) se asumió que el carbono total corresponde al carbono orgánico del suelo (COS; Espinosa, Y; Florentino, A; Nieuwenhuyse, A. com. personal).

Las determinaciones físicas en las muestras de suelos fueron realizadas en el laboratorio suelo-agua-planta del Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía de la UCV en Maracay, estado Aragua, Venezuela, siguiendo las metodologías descritas por Plá Sentis (1977). En las muestras no alteradas se determinó: la humedad del suelo por el método termogravimétrico, densidad aparente (D_a), porosidad total (espacio poroso total, macroporos, microporos), conductividad hidráulica saturada (K_s) y distribución de agregados estables al agua (AEA) determinado por el método de Yoder. Las determinaciones se realizaron aplicando las siguientes ecuaciones (Plá Sentis 1977):

a. Contenido de humedad

$$H(\%) = (Psh - Pss)/Pss \times 100 \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde: H es el contenido de humedad del suelo expresada en base a peso del suelo, Psh es el peso húmedo del suelo (g) y Pss es el peso seco del suelo (g) a 105 °C.

b. Densidad aparente

$$Da = Mss / Vt \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde: Da es la densidad aparente y se expresó en Mg m⁻³. Mss es la masa de suelo (g) seco a 105 °C y Vt es el volumen total del suelo y equivale al volumen interno del cilindro.

c. Porosidad total

$$EPT(\%) = (VTP/VTS) \times 100 \quad \text{[Ecuación 3]}$$

$$VTP/VTS = (V_{\text{macroporos}}/VTS) + V_{\text{microporos}}/VTS \quad \text{[Ecuación 3.1]}$$

Donde: EPT es el espacio poroso total, VTP es el volumen total de poros, VTS es el volumen total de suelo, V_{macroporos} es el volumen ocupado por los macroporos y V_{microporos} es el volumen ocupado por los microporos. Para los cálculos se tomó en consideración la siguiente relación de capilaridad:

$$r = 0,15/h \quad \text{[Ecuación 3.2]}$$

Donde: h = 100 cm (que corresponde a la altura de la columna de agua) y r es el radio equivalente de los poros en el punto de separación, el cual sería de 15 μm. Por lo tanto, se consideró como macroporos los poros con radio equivalente > 15 μm (poros Θ>15 μm) y microporos los poros con radio equivalente < 15 μm (poros Θ<15 μm).

d. Conductividad hidráulica saturada

$$Ks = V / A \times \Delta t ((H+L) / L) \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde: Ks es la conductividad hidráulica saturada (cm h⁻¹), A es el área de la sección circular horizontal del cilindro (cm²), V es el volumen de agua recogido en el cilindro

graduado (cm^3), Δt es el tiempo (en horas) transcurrido desde que comenzó a recogerse el agua percolada hasta la medición final del volumen (V) de ésta, H es la carga de agua que se mantiene constante por encima del nivel superior del cilindro de suelo (cm), L es la altura del cilindro de suelo (cm) y $(H+L)/L$ es el gradiente hidráulico.

e. Estabilidad de los agregados al agua

$$\text{AEA}(\%) = (\text{B}-\text{C})/(\text{A}-\text{C}) \times 100 \quad \text{[Ecuación 5]}$$

Donde: AEA es el % de agregados estables al agua, calculado para cada rango de tamaño de agregados; A es el peso de la muestra de agregados con un diámetro equivalente entre 2 y 4 mm (aproximadamente 20 g); B es el peso seco (a 105 °C) de los agregados que quedaron estables en cada uno de los tamices (2; 1; 0,5 y 0,25 mm) luego de ser tamizados en húmedo y C es el peso de las arenas.

El diámetro medio ponderado de los agregados (DMP) fue calculado con la siguiente ecuación:

$$\text{DMP} = \sum_{i=1}^n d_m \times C \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde: d_m es el diámetro medio de los agregados y C es el peso de los agregados correspondientes a cada tamiz (2; 1; 0,5 y 0,25 mm).

f. Carbono almacenado en el suelo

El COS (Mg C ha^{-1}) almacenado en el perfil de suelo se obtuvo como el producto de la superficie (ha), por la profundidad o espesor de muestreo, por la densidad aparente del suelo, por el contenido promedio de COS determinado en la muestra (MacDicken 1997):

$$\text{COS} = (\text{CCS}/100) \times \text{Pm} \times \text{Da} \times 10000 \quad \text{[Ecuación 7]}$$

Donde: COS es el carbono orgánico en el suelo (Mg ha^{-1}), CCS es el contenido de carbono total en el suelo (%), Pm es el espesor de muestreo en el perfil de suelo (m) y Da es la densidad aparente (Mg m^{-3}).

Para evitar sobreestimaciones del COS, se hizo el ajuste del peso del suelo de acuerdo a la densidad aparente en cada profundidad de muestreo y para cada TUT siguiendo la metodología sugerida por Ellert et ál. (2002) y Buurman et ál. (2004). Para los cálculos se tomó como patrón de referencia la parcela 2 del TUT-BF, ya que fue el suelo que presentó la menor densidad aparente. Con los resultados obtenidos se calculó el COS en el suelo hasta 1 m de profundidad equivalente ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ 1 m-eq}^{-1}$) mediante la sumatoria de las cantidades estimadas en cada profundidad de muestreo.

3.3.4 Análisis de datos de las variables físicas y químicas de suelos

Para el análisis de los resultados de las variables evaluadas se utilizó estadística descriptiva. Para describir y analizar la variabilidad de los parámetros físicos y químicos de los suelos bajo estudio y a la vez agruparlos por estas características, se aplicaron métodos de análisis multivariado como el análisis de conglomerados (AC) y el análisis de componentes principales (ACP).

Para el AC se utilizaron las variables físicas y químicas evaluadas en los suelos a las profundidades de muestreo establecidas (0-5, 5-20, 20-40 y 40-100 cm) y los TUT como criterios de clasificación. Mediante el ACP se identificó la variabilidad explicada por cada componente principal (CP) y la contribución de las variables originales del suelo a la variabilidad observada. A partir del ACP se elaboraron diagramas de distribución de los grupos de suelos formados para los TUT en los CP 1 y 2. Los análisis estadísticos fueron realizados con el software InfoStat versión 2006 p2 (InfoStat 2006).

Se analizó la tasa de reducción del COS en función de la profundidad. Se obtuvo un modelo exponencial de disminución del COS para los diferentes TUT. Para ello se utilizó el siguiente modelo general:

$$Y_{ij} = a_i e^{b_i x_j} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Donde:

Y_{ij} = Es el contenido de COS en el i-ésimo TUT proveniente de la profundidad j.

a_i = Es el intercepto estimado para el modelo exponencial del i-ésimo TUT.

b_i = Es la tasa de disminución del COS con la profundidad para cada TUT.

X_j = Es la profundidad del suelo en la que se observó el COS.

El Modelo exponencial linealizado fue expresado de la siguiente manera:

$$Y_{ij} = a_i e^{b_i x_j} \longrightarrow \text{Ln}(y_{ij}) = \text{Ln}(a_i) + b_i x_j \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Se realizó el análisis de varianza para el modelo exponencial para comparar la tasa de disminución del COS en el suelo entre los diferentes TUT, y se aplicó una prueba de medias de mínimas diferencias significativas para las pendientes. Estos análisis fueron realizados mediante el programa estadístico R (Development Core Team R. 2007).

3.4 Estimación de carbono en la biomasa aérea y en la necromasa

3.4.1 Componente arbóreo del bosque primario y pastura con árboles dispersos

Para la determinación de la biomasa aérea del BP se establecieron con brújula SUUNTO KB-14 (SUUNTO, Vaanta, FI) y cinta métrica cuatro parcelas (unidades experimentales), de acuerdo con la metodología sugerida por Louman (2002) de parcelas rectangulares anidadas con una esquina en común (Figura 5). En las parcelas, se consideró como centro la calicata principal utilizada para el muestreo de suelos.

En cada parcela se realizó un censo de las especies arbóreas, sin incluir lianas ni bejucos, se estratificó por el diámetro a la altura del pecho (DAP, 1,30 m) y altura total (H) en:

- a. Fustales (árboles con DAP mayor a 10 cm y altura mayor a 5 m) medidos en la parcela de 250 m².
- b. Latizales altos (árboles de 5 a 9,9 cm de DAP) medidos en la subparcela de 100 m².
- c. Latizales bajos (leñosas con altura mayor a 1,5 m y DAP hasta 4,9 cm) medidos en la subparcela de 25 m².
- d. Brinzales (plántulas de 0,3 a 1,5 m) medidos en dos subparcelas de 4 m² cada una.

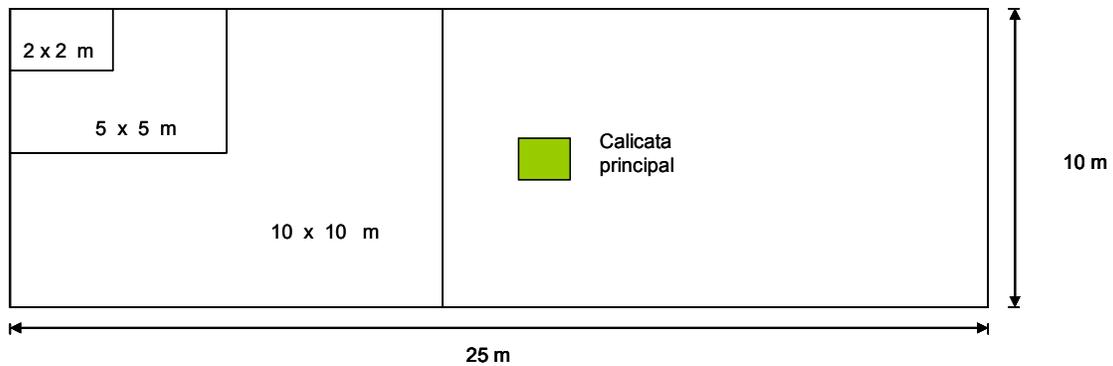


Figura 5. Representación esquemática de las parcelas rectangulares anidadas para el muestreo de carbono en la biomasa aérea del bosque y ubicación de la calicata principal.

Adaptado de Louman (2002).

Para estimar la biomasa presente en el TUT PAD se censaron las especies arbóreas. Para lo cual se subdividieron los dos potreros seleccionados (IV-A y IV-B) en cuatro parcelas de igual dimensión (0,84 ha por parcela).

En ambos TUT (BP y PAD), se identificaron los individuos por su nombre común con el apoyo de Dumas Conde y Luis Peña (estudiantes de FAGRO-UCV) y el Sr. Orlando Piña (baquiano de la zona) y se colectaron muestras botánicas para su identificación taxonómica. Se midió el DAP con cinta diamétrica Richter Mabanfang "H" (Richter, DE) y las alturas se tomaron con un clinómetro SUUNTO PM-5/360 PC (SUUNTO, Vaanta, FI), cinta métrica y vara graduada. En los árboles con gambas se midió el DAP en un punto más arriba de donde estas emergían y donde el fuste era más cilíndrico. Luego, se estimó el DAP a la altura correspondiente (1,3 m), de acuerdo a la variación observada por unidad de longitud.

En la pastura con árboles dispersos para estimar el radio de copa se tomaron dos mediciones del diámetro de la copa, uno en el sentido del lado más angosto y otro en el lado más ancho, para ello se utilizó la proyección de la copa en el suelo. La identificación taxonómica de las muestras botánicas fue realizada por el profesor Luis Hernández Chong del Departamento de Botánica de FAGRO-UCV, Maracay, Venezuela. Se identificaron a nivel de familia, género y especie alrededor del 90% de las muestras tomadas en campo. Los individuos no identificados fueron procesados como especie desconocida.

En el caso de árboles bifurcados a una altura menor de 1,3 m (dos o más tallos), fueron considerados como un solo árbol y se calculó el diámetro cuadrático medio (Dc) considerando la siguiente ecuación:

$$Dc = \sqrt{\sum d_i^2} \quad \text{[Ecuación 10]}$$

Donde: Dc es el diámetro cuadrático medio y d_i es el diámetro de cada tallo a 1,3 m. Para los cálculos posteriores se consideró al Dc equivalente al DAP.

El área basal de los árboles con $dap > 10$ cm se estimó mediante la ecuación señalada por Prodan et ál. (1997):

$$G = (\pi / 4) \times DAP^2 / 10000 \quad \text{[Ecuación 11]}$$

Donde: G es el área basal ($m^2 ha^{-1}$) y DAP, es el diámetro a la altura del pecho (cm).

Para estimar la biomasa aérea total por árbol y posteriormente el carbono almacenado en el BP, se probaron diferentes modelos alométricos desarrollados para bosques tropicales que estiman la biomasa y el carbono a partir del DAP, H y densidad específica de la madera (Cuadro 5). Posteriormente, se seleccionó uno de los modelos para las estimaciones correspondientes.

La evaluación de los diferentes modelos alométricos (Brown 1997, Ferreira 2001, Ketterings et ál. 2001, Zapata et ál. 2003, Chave et ál. 2005) para estimar la biomasa aérea de bosques tropicales permitió la selección del modelo alométrico I.3 desarrollado por Chave et ál. (2005). Se seleccionó este modelo porque presentó un alto coeficiente de determinación (R^2), su lógica biológica y las variables predictoras más importantes de la biomasa aérea de un árbol fueron el DAP, la gravedad específica de la madera, la altura total y el tipo de bosque.

Cuadro 5. Ecuaciones alométricas analizadas para estimar la biomasa aérea de árboles en un fragmento de bosque primario en San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Ecuación alométrica	R ²	Rango del DAP (cm) y n	Localidad / Zona de vida	Fuente
$\text{Ln}B = -2,134 + 2,53 * \text{Ln}(D)$	0,97	5,0-148,0 (160)	Modelo general, Bh-t	Brown 1997
$\text{Log}_{10}B = -4,4661 + 2,7071 * \text{Log}_{10}(D)$	0,90	5,0-66,6 (160)	Mun. San Carlos, Nicaragua, Bh-t, Bs-t	Ferreira 2001
$\text{Ln}B = 2,684 + 2,4376 * (D)$		7,6-48,1 (29)	Sumatra, Indonesia, BS	Ketterings et ál. 2001
$\text{Ln} B = -2,286 + 2,471 * \text{Ln}(D)$	0,98	1,0-56,0 (144)	Antioquia, Colombia, Bh-t premontano	Zapata et ál. 2003
I.1. $\text{Ln}B = 2,68 + 1,805 * \text{Ln}(D) + 1,038 * \text{Ln}(H) + 0,377 * \text{Ln}(\rho)$	0,99			
I.3. $\text{Ln}B = -2,235 + 0,916 * \text{Ln}(D^2 * H * \rho)$	0,99	5,0-156,0 (1808)	Veinte diferentes sitios del trópico en América, Asia y Oceanía y varias zonas de vida (Bh-t, Bs-t)	
I.5. $\text{Ln}B = -2,843 + \text{Ln}(D^2 * H * \rho)$	0,99			
II.1. $\text{Ln}B = -1,023 + 1,821 * \text{Ln}(D) + 0,198 * (\text{Ln}(D))^2 - 0,0272 * (\text{Ln}(D))^3 + 0,388 * \text{Ln}(\rho)$	0,99			
II.3. $\text{Ln}B = -0,730 + 1,784 * \text{Ln}(D) + 0,207 * (\text{Ln}(D))^2 - 0,0281 * (\text{Ln}(D))^3 + \text{Ln}(\rho)$	0,96	5,0-156,0 (2410)	Veintisiete diferentes sitios del trópico en América, Asia y Oceanía y varias zonas de vida (Bh-t, Bs-t)	Chave et ál. 2005
II.5. $\text{Ln}B = -1,083 + 2,266 * \text{Ln}(D) + \text{Ln}(\rho)$	0,99			
$\text{Ln}B = -2,187 + 0,916 * \text{Ln}(\rho D^2 H)$			Modelo general, que incluye un factor de corrección	

Donde: B= biomasa (kg árbol⁻¹), D= DAP en cm, H= altura total del árbol (m), ρ= densidad específica de la madera (g cm⁻³) y n = número de árboles evaluados en el estudio.

Además, para su desarrollo y prueba se consideró una base de datos de 2.410 árboles de DAP > 5 cm, correspondientes a 27 estudios conducidos en diferentes bosques de la región tropical; específicamente América, Asia y Oceanía. Incluyendo tres trabajos realizados en diferentes sitios de Venezuela.

El modelo I.3 propuesto por Chave et ál. (2005) para predecir la biomasa de árboles en bosques maduros tropicales se expresó:

$$\text{Ln (B)} = -2,235 + 0,916 \text{ Ln (DAP}^{2*}\text{H *}\rho) \quad \text{[Ecuación 12]}$$

Donde: B es la biomasa del árbol (kg árbol⁻¹), DAP, es el diámetro a la altura del pecho (cm), H es la altura total del árbol (m) y ρ es la densidad específica de la madera (g cm⁻³).

La densidad específica de la madera se estimó como un promedio ponderado a nivel de especies (Brown et ál. 1989, Nelson et ál. 1999, Ketterings et ál. 2001, Chave et ál. 2005); para ello, los valores de la densidad específica de la madera por especie se tomaron de la base de datos de *World Agroforestry Centre* (2006).

Para estimar la biomasa aérea total y el carbono total de los árboles en el TUT PAD, con los datos de campo del presente estudio (datos de árboles del TUT PAD) se probaron graficamente siete modelos alométricos desarrollados por Ruiz (2002) para árboles dispersos en potreros en condiciones de Bosque Seco Tropical en Matiguás, Nicaragua (Cuadro 6). De los modelos probados se seleccionó el siguiente:

$$\text{Ln (B)} = -8,83 + 1,8973 \times \text{Ln(DAP)} + 0,6191 \times \text{Ln(H)} \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Se seleccionó este modelo porque consideró dos variables como el DAP y H; las cuales se midieron en el censo de árboles en potrero; presentó una adecuada lógica biológica de las curvas generadas con los datos del presente estudio; y mostró alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0,95$) y bajo índice de sesgo (0,9%) para los datos del modelo original generado por Ruiz (2002).

Cuadro 6. Ecuaciones alométricas analizadas para estimar la biomasa aérea de árboles en una pastura con árboles dispersos en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Ecuación alométrica	R ²	Índice de sesgo (DA)
$\text{Ln}B = -5,0201+0,1844(D)-0,00144(D^2)$	0,94	0,007
$\text{Ln}B = -8,2189+2,1796*\text{Ln}(D)$	0,94	0,015
$\text{Log}_{10}B = -2,18062+0,08012(D)-0,0006244(D^2)$	0,94	0,005
$\text{Log}_{10}B = -3,5694+2,1796*\text{Log}_{10}(D)$	0,94	0,015
$\text{Ln}B = -6,0519+0,9190*\sqrt{D}$	0,89	-0,142
$\text{Log}_{10}B = -2,6283+0,3991*\sqrt{D}$	0,89	-0,141
$\text{Ln}B = -8,83+1,8973*\text{Ln}(D)+0,6191*\text{Ln}(H)$	0,95	0,009

Donde: B= biomasa total (kg árbol⁻¹), D= DAP en cm, H= altura total del árbol (m) y DA= diferencia agregada.

Fuente: Ruiz (2002).

3.4.2 Componente arbustivo de la pastura en callejones de *Leucaena leucocephala* y banco forrajero de *Gliricidia sepium*

Para determinar la biomasa aérea de los arbustos de *L. leucocephala* y *G. sepium*, biomasa de la pastura y peso seco de la necromasa en los TUT PCL y BF se establecieron en cada sistema cuatro parcelas con las siguientes características:

- Pastura en callejones de *L. leucocephala*: en el potrero I del MF-ATS se seleccionaron como parcelas para muestreo los módulos de pastoreo I-3, I-6, I-9 y I-12 y en ellas se ubicaron las calicatas para el muestreo de suelo (Figura 6).
- Banco forrajero de *G. sepium*: se establecieron cuatro parcelas de 100 m² (10 m x 10 m), considerando la distribución espacial de las plantas de *G. sepium* de acuerdo a su edad (5 y 8 años) y se tomó como centro la calicata principal utilizada para el muestreo de suelo (Figura 7).

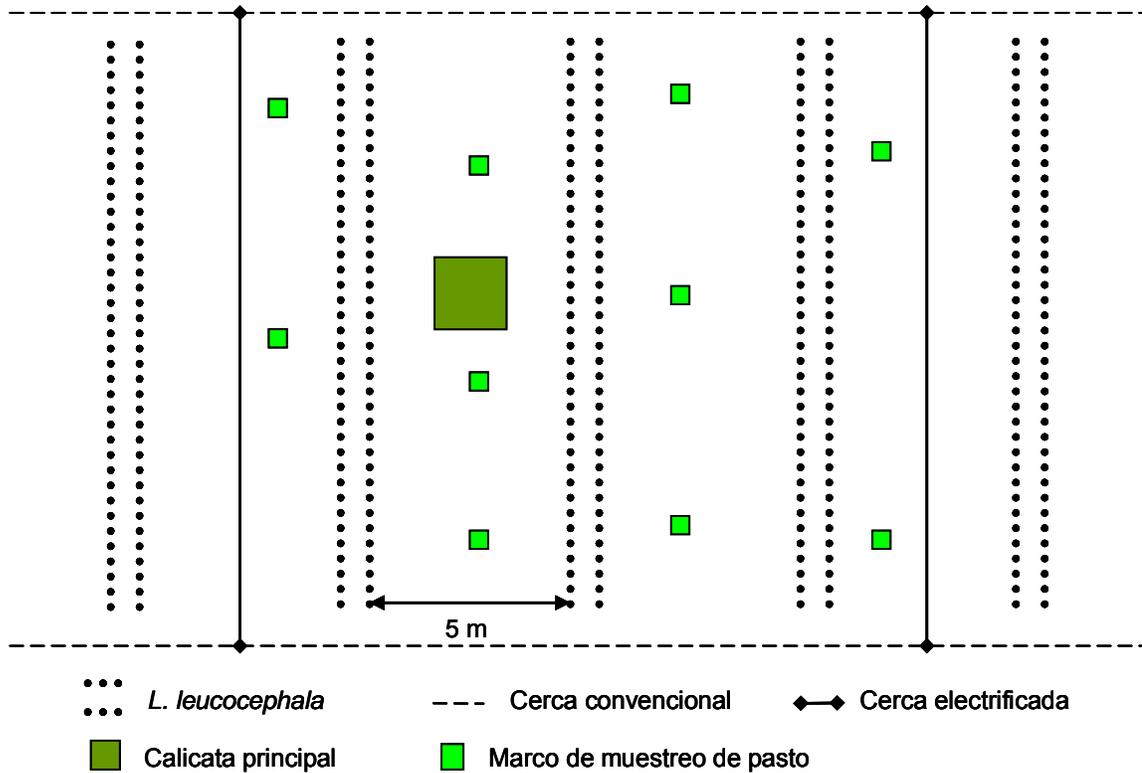


Figura 6. Representación esquemática de las parcelas para el muestreo de carbono en el suelo, biomasa aérea y necromasa de la pastura en callejones de *L. Leucocephala* del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Para determinar la biomasa aérea de los arbustos de *L. leucocephala* y *G. sepium* se desarrollaron modelos alométricos, para ello se utilizó un muestreo destructivo (Segura y Kanninen 2002), estratificando por edad en el banco de *G. sepium* (plantas de 5 y 8 años, respectivamente). Previamente, mediante muestreos sistemáticos realizados en toda el área de los TUT PCL y BF, se midió con cinta diamétrica o vernier (en el caso de los tallos con diámetro < 2,0 cm) el diámetro basal a 30 cm de altura (Db_{30}) de las plantas de *L. leucocephala* y *G. sepium*.

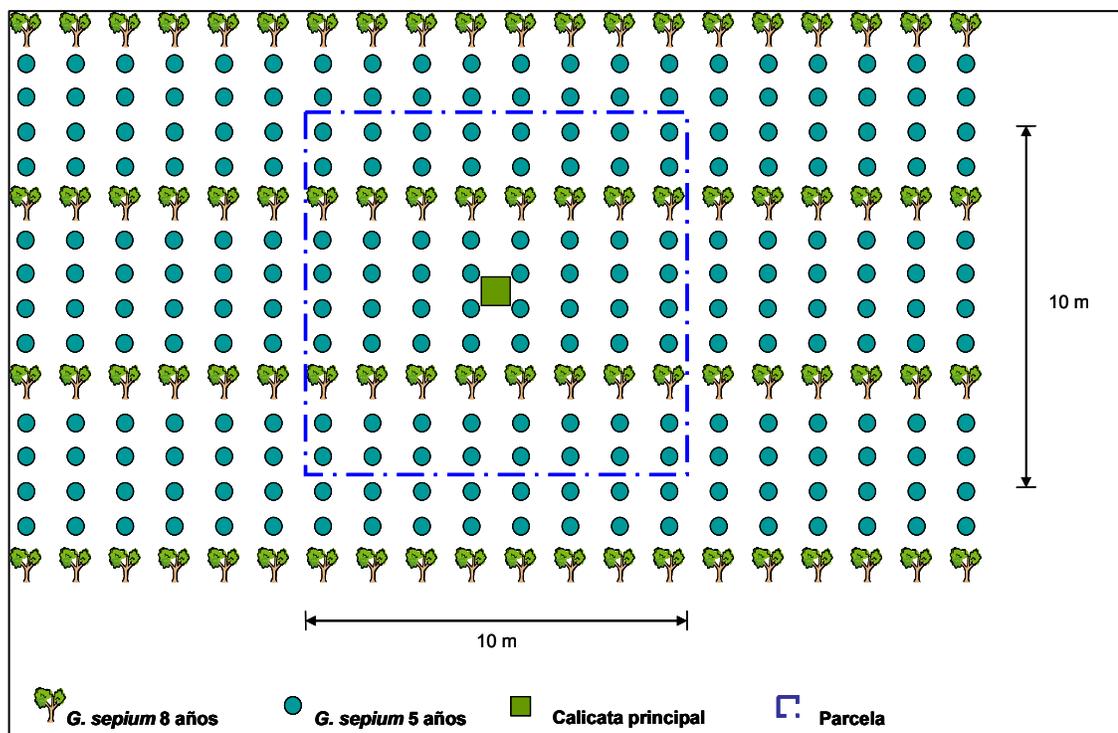


Figura 7. Representación esquemática del diseño de muestreo de carbono en el suelo, en la biomasa aérea y necromasa del banco forrajero de *G. sepium* del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Luego, los datos de Db_{30} se procesaron y se establecieron las categorías de clases diamétricas para los arbustos de *L. leucocephala* y *G. sepium*. En ambos casos, en los arbustos que presentaron más de un tallo o eje principal, a partir de los valores de Db_{30} se calculó el diámetro cuadrático medio basal a 30 cm de altura (Dcb_{30}), considerando la ecuación:

$$Dcb_{30} = \sqrt{\sum d_i^2} \quad \text{[Ecuación 14]}$$

Donde: d_i es el diámetro del tallo medido a 30 cm de altura de la planta.

Posteriormente, mediante muestreo sistemático se seleccionaron 43 plantas de *L. leucocephala* y 33 de *G. sepium* distribuidas en las clases diamétricas establecidas con anterioridad. A éstas, se les midió con una vara graduada la altura al punto de poda (H_{pp}) y

la altura total (H); el Db_{30} y tres mediciones del diámetro en la protuberancia⁷ del tallo principal (Dp), utilizando una cinta diamétrica y vernier. Luego, se cortaron las plantas, se fraccionaron en tallo o eje principal, ramas y hojas y se pesaron por componente con una balanza portátil.

Por cada fracción de la planta y clase diamétrica establecida para *L. leucocephala* y *G. sepium*, se tomaron dos muestras de biomasa de aproximadamente 500 g, se colocaron en bolsas previamente rotuladas para su identificación y se llevaron al laboratorio para determinar el contenido de materia seca (MS) en estufa de aire forzado a 105 °C hasta peso constante. Con los resultados obtenidos se estimó la biomasa seca por fracción de la planta y mediante la sumatoria de estas se obtuvo la biomasa total por individuo.

De manera similar al Dcb_{30} , y debido a que generalmente se forman varias protuberancias en el punto de poda de los arbustos de *L. leucocephala* y *G. sepium*, se calculó el diámetro cuadrático medio de la protuberancia del tallo (Dcp) mediante la siguiente ecuación:

$$Dcp = \sqrt{\sum d_j^2} \quad \text{[Ecuación 15]}$$

Donde: d_j es el diámetro en la protuberancia de la planta en el punto de poda.

Con base en los resultados de biomasa seca, Hpp, Ht, Dcb_{30} y Dcp se desarrollaron modelos de regresión para predecir la biomasa total y del fuste o tallo principal de las plantas de *L. leucocephala* y *G. sepium*. En esta última especie se generaron modelos alométricos por edad (5 y 8 años) y uno combinado para ambas edades. Posteriormente, mediante muestreo sistemático se seleccionaron 100 plantas de *L. leucocephala* en cada parcela, y en el caso de *G. sepium*, todas las plantas presentes en la parcela; se midió la Ht, Hpp, Db_{30} y el Dp en tres secciones diferentes de la protuberancia.

A partir de los modelos alométricos desarrollados, tanto para *L. leucocephala* como para *G. sepium*, y con los datos anteriores se estimó la biomasa arbórea por individuo, por parcela y por hectárea. Para estimar la densidad de población de *G. sepium* se consideró la edad de

⁷ Sección del tallo donde emergen los rebrotes luego de la poda o ramoneo de los arbustos por los bovinos.

las plantas y se estimó la proporción del área ocupada por los arbustos de cada edad (Figura 7), de manera de evitar sobreestimaciones en los cálculos correspondientes a biomasa aérea y carbono total.

En el TUT BF, la biomasa aérea (biomasa total y biomasa del tallo) y carbono total almacenado en *G. sepium* se obtuvo mediante la sumatoria de los valores estimados de estas variables para ambas edades, expresados por unidad de área.

3.4.3 Desarrollo de modelos alométricos para estimar la biomasa aérea en *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium*

Para el desarrollo de modelos alométricos para estimar la biomasa aérea de *L. leucocephala* y *G. sepium* se realizaron análisis de correlación para evaluar la relación entre las variables evaluadas y de regresión para determinar la significancia de las variables utilizadas. Los análisis estadísticos se realizaron con el software Statistical Analysis Systems (SAS Institute 1988). Los modelos obtenidos se evaluaron de acuerdo a los siguientes criterios:

- a. Lógica biológica del modelo generado
- b. Mayor valor del coeficiente de determinación (R^2)
- c. Menor valor del cuadrado medio del error (CME)
- d. Significancia estadística de los parámetros del modelo
- e. Simplicidad de obtención de las variables en campo.

En el desarrollo de las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea de los arbustos de *L. leucocephala* y *G. sepium* se exploraron gráficamente las relaciones entre las variables consideradas potencialmente como predictoras (Dcb_{30} , Dcp , Hpp y Ht) y la biomasa del tallo y la biomasa total de los arbustos.

Para evaluar la precisión de estimación de los modelos generados se aplicó la ecuación propuesta por Overman et ál. (1994):

$$\delta B = \frac{[\sum_{i=1}^n (\check{D}W_i - DW_i) / DW_i] \times 100}{n} \quad \text{[Ecuación 16]}$$

Donde: δB es la precisión de estimación del modelo generado, $\check{D}W_i$ es la masa estimada del árbol i y DW_i es la masa observada del árbol i .

3.4.4 Gramíneas

El muestreo de las gramíneas para estimar la biomasa y el carbono presente se realizó en los TUT PCL, PAD y CAZ, por ser estos los que presentaron este componente. En los dos primeros sistemas correspondió a pastos y en el tercero al cultivo de caña de azúcar:

a. Gramíneas del TUT PCL y PAD

Para estimar la producción de biomasa y la biomasa residual de la pastura en las parcelas seleccionadas en el TUT PCL y PAD se realizaron muestreos antes y después del pastoreo de los animales. En el TUT PCL el monitoreo se efectuó desde febrero hasta julio; mientras que en el TUT PAD durante marzo a julio de 2005.

Se tomaron 20 muestras por parcela con marcos de metal de 0,5 m x 0,5 m, distribuidos en transeptos en los callejones de la pastura; mientras que en la pastura con árboles dispersos se distribuyeron al azar en toda el área. En cada marco, se determinó visualmente la presencia para estimar la composición botánica y la cobertura. Luego, se cortó el pasto a 5 cm del suelo y se pesó con una balanza portátil, para obtener el peso fresco.

Las muestras de pasto obtenidas se mezclaron homogéneamente y se tomaron dos submuestras de aproximadamente 300 g, las cuales se colocaron en bolsas plásticas previamente identificadas.

b. Gramínea del TUT CAZ

Para el muestreo en el TUT CAZ, se seleccionaron cuatro parcelas de 10 m x 10 m (100 m²). Se cosechó y fraccionó la caña de azúcar en tallo, cogollo⁸ y hojarasca⁹. Los tallos y cogollos se pesaron y se tomaron dos submuestras de aproximadamente 500 g por componente y por parcela. Debido a que el cultivo de caña de azúcar se cosecha anualmente, las mediciones en este TUT se realizaron una sola vez por parcela, correspondiendo éstas a los meses de junio y julio, en función del ciclo del cultivo y a la cosecha secuencial para alimentación animal en el MF-ATS.

Posteriormente, las muestras generadas se secaron en estufa de aire forzado, a 65 °C en el caso de pastos y 105 °C para caña de azúcar, hasta peso constante para determinar el contenido de MS.

3.4.5 Necromasa sobre el suelo

Para estimar el peso seco de la necromasa¹⁰ se realizaron muestreos en 30 puntos marcados en forma permanente por parcela durante el período en evaluación con marcos de 0,5 m x 0,5 m distribuidos de acuerdo al sistema evaluado:

- a.** TUT PCL: se muestreó tomando en cuenta la posición respecto a la doble hilera de arbustos de *L. leucocephala*. Se consideraron seis posiciones de muestreo y en cada una se tomaron cinco muestras de hojarasca para un total de 30 repeticiones por parcela.

Los puntos de muestreo con respecto a la doble hilera de *L. leucocephala* fueron: 1) en el centro (0 m), 2) a 0,5 m, 3) a 1,0 m, 4) a 1,5 m, 5) a 2,0 m y 6) a 2,5 m. La evaluación se realizó durante el período mayo - septiembre y comprendió cinco muestreos por parcela.

⁸ Parte apical de la planta de caña de azúcar.

⁹ Restos de hojas senescentes de la planta de caña de azúcar, considerados como hojarasca fina.

¹⁰ Constituida por hojarasca fina y detritos no finos.

- b. TUT BP y BF: muestreo al azar en las parcelas de 250 y 100 m², respectivamente. Se realizaron cuatro mediciones de hojarasca durante el período mayo a septiembre de 2005. Debido a la presencia en el TUT BP de detritos no finos (troncos y ramas > de 2 cm) se recogieron y pesaron todos los fragmentos presentes por parcela.
- c. TUT CAZ: la hojarasca desprendida de la planta durante la cosecha de la caña de azúcar se recolectó con la que se encontró en el suelo en cada parcela evaluada.
- d. TUT PAD: se muestreó la hojarasca tomando en cuenta la posición con respecto a los árboles dispersos en la pastura. Se consideraron tres posiciones y en cada una se tomaron diez muestras. Las posiciones de muestreo con respecto al árbol fueron: 1) en la base del árbol, 2) al extremo de la copa del árbol y 3) fuera de la copa del árbol (pastura a pleno sol). Las mediciones se realizaron durante el período junio –septiembre de 2005.

En todos los casos, cada marco de muestreo se marcó y se recolectó toda la necromasa (que en la mayoría de los casos correspondió a hojarasca, excepto en el TUT BP) procedente de herbáceas, arbustos y árboles, y se pesó con una balanza portátil para determinar el peso fresco. Posteriormente, se volvió a recoger y a pesar toda la necromasa en los marcos de muestreo ya establecidos. Las muestras se mezclaron homogéneamente y luego se tomaron tres submuestras de aproximadamente 300 g, que fueron colocadas en bolsas rotuladas para su identificación. Luego, se determinó el contenido de MS en estufa de aire forzado a 105 °C hasta peso constante y posteriormente se determinó el peso seco de la necromasa. Se obtuvo el valor promedio de MS y posteriormente se hicieron los ajustes correspondientes a los valores de peso seco de necromasa.

Con los datos obtenidos en las mediciones consecutivas de necromasa se estimó la tasa de acumulación semanal de materia seca por TUT. Para ello, se recurrió a la siguiente ecuación:

$$\text{TASH} = (\text{PSH} / \text{N}^{\circ}\text{d}) \times 7 \quad \text{[Ecuación 17]}$$

Donde: TASH es la tasa de acumulación semanal de hojarasca por TUT (Mg MS ha⁻¹ semana⁻¹), PSH es el peso seco de la hojarasca acumulada entre muestreos (Mg MS ha⁻¹) y N^od es el número de días transcurridos entre muestreos. Posteriormente, se estimó el valor

promedio para esta variable.

Para estimar el carbono almacenado en la biomasa del componente leñoso y herbáceo, y en la necromasa se utilizó la siguiente ecuación, basada en la biomasa y la fracción de carbono:

$$\mathbf{CA = PS \times fc} \qquad \mathbf{[Ecuación 18]}$$

Donde: CA es el carbono almacenado ($t\ C\ ha^{-1}$), PS es el peso seco del componente ($t\ MS\ ha^{-1}$) y fc es la fracción de carbono de la biomasa y la necromasa seca; que para efectos del estudio se asumió un valor de 0,5 (Brown y Lugo 1984, IPCC 1996).

3.5 Fijación de carbono en el sistema

3.5.1 Componente leñoso

La fijación de carbono en la biomasa aérea presente en las especies *L. leucocephala* y *G. sepium* se estimó considerando el carbono estable en el componente leñoso (almacenado en el tallo principal de los arbustos y no sujeto a remoción por factores de manejo del sistema) y la edad de los árboles. Para ello se aplicó la siguiente ecuación:

$$\mathbf{CF = CA / EA} \qquad \mathbf{[Ecuación 19]}$$

Donde: CF es el carbono fijado en la biomasa del tallo del árbol ($Mg\ C\ ha\ año^{-1}$), CA es el carbono almacenado en la biomasa del tallo ($Mg\ C\ ha^{-1}$) y EA es la edad del árbol (años).

Para estimar el carbono fijado en los árboles del TUT PAD, para los cuales no se pudo determinar la edad, se estimó la dominancia por especie por el criterio de área basal (Segura 2005), obteniéndose las especies arbóreas dominantes en el sistema. Posteriormente, para estimar la variación anual del carbono en la biomasa arriba del suelo se consideró la tasa de crecimiento para samán *Samanea saman*, reportada por Solórzano y Alvarado (2004), creciendo en condiciones de Bosque Seco Tropical y suelos Ultisoles en el estado Portuguesa, Venezuela. Los valores reportados por estos autores para el incremento en el DAP y altura total fueron de $1,33\ cm\ año^{-1}$ y $1,15\ m\ año^{-1}$, respectivamente.

Luego, se estimaron los valores de DAP y altura total para el año 2, se estimó la biomasa aérea de las especies arbóreas mediante la ecuación seleccionada de Ruiz (2002) y después, se obtuvo el carbono almacenado para ese año. Conocido el almacenamiento de carbono en los años 1 y 2 se aplicó la siguiente ecuación para determinar la fijación anual de carbono:

$$CF = CA_2 - CA_1 \quad \text{[Ecuación 20]}$$

Donde: CF es el carbono fijado (Mg C ha año^{-1}) y CA es el carbono almacenado en la biomasa aérea (Mg C ha^{-1}) en el año respectivo.

3.5.2 Suelo

Para estimar el carbono orgánico fijado en el suelo se consideraron los valores de densidad aparente y contenido de materia orgánica para los diferentes TUT generados en la caracterización inicial de los suelos del MF-ATS para la profundidad 0-5 cm y 5-15 cm (Cuadro 3, UCV 1999). El peso del suelo hasta 15 cm de profundidad fue ajustado siguiendo la metodología propuesta por Ellert et ál. (2002) y Buurman et ál. (2004). Posteriormente, se estimó el carbono almacenado en el suelo hasta esta profundidad (Ecuación 7).

El carbono fijado en el suelo se obtuvo como la diferencia entre el carbono observado en el estudio de línea base de la UCV (1999) y los valores obtenidos en este estudio (cuya fase de campo se realizó en el año 2005), dividido entre el número de años transcurridos entre ambos estudios (6 años).

Para el caso del suelo de la pastura con árboles dispersos (TUT PAD) como no se dispuso de datos en el estudio de la UCV (1999) (ya que para ese año no se había constituido esta área como potrero del MF-ATS), se asumió que los valores de densidad aparente y materia orgánica son iguales a los reportados para el suelo del sistema pasto - *G. sepium* (sitio 1; UCV 1999). Este supuesto, se basa en el hecho de que los sistemas (pasturas) se ubican relativamente próximos, en suelos de una misma unidad agroecológica (Zambrano, 1986) y pertenecen al orden Alfisoles (Torres y Madero 1999; Rey et ál. 2005), con topografía

ondulada, en ambos predomina la gramínea *P. maximum* y fueron manejados bajo pastoreo rotativo de bovinos de doble propósito.

3.6 Caracterización del sub-sistema bovinos doble propósito

Para estimar las emisiones de GEI provenientes de procesos y actividades antropogénicas el IPCC (2006) dispone de metodologías, de aplicación a diferente nivel de detalle, que requieren mediciones y caracterizaciones en los sistemas donde se identifiquen las fuentes de emisiones. En el caso del sub-sistema bovinos doble propósito del MF-ATS, se realizó su caracterización con esta finalidad, considerando los siguientes aspectos:

- a. Composición del rebaño según los grupos etarios y flujo de animales durante el período 2003-2005. Para ello se revisaron las bases de datos del MF-ATS, se realizaron evaluaciones de campo y se determinaron las ventas, compras y muertes de animales.
- b. Manejo de los animales y las pasturas.
- c. Medición de variables productivas y reproductivas del rebaño bovino para el período 2003-2005. Estas mediciones se realizaron de acuerdo a los protocolos de trabajo establecidos en el MF-ATS y en algunos casos se recurrió a los datos generados en años anteriores al 2005 para disponer de series de datos.
- d. Manejo alimenticio y valor nutritivo de los forrajes y suplementos ofrecidos a los animales.
- e. Uso de maquinaria agrícola y cantidades aplicadas de fertilizantes químicos y orgánicos.

3.6.1 Manejo del rebaño de bovinos de doble propósito

Para el momento de la evaluación el rebaño bovino doble propósito del MF-ATS estaba conformado por vacas mestizas (*Bos taurus* x *Bos indicus*) con predominio de los cruces Holstein x Cebú y Pardo Suizo x Cebú, un toro F1 (Holstein x Brahman) y animales en crecimiento. La reproducción se basó en monta natural y el sistema se orientó a la producción de leche y carne.

Las vacas se manejaron bajo pastoreo rotativo en el TUT PCL, con una carga animal promedio de 2,2 a 2,5 UA ha⁻¹, con tiempo de ocupación de dos días y 74 días descanso. El ordeño se realizó en forma manual dos veces al día con presencia del becerro.

Los becerros (hembras y machos) se criaron mediante amamantamiento restringido (2 veces al día, después del ordeño durante aproximadamente 30 minutos), pastoreo de *C. nlemfuensis*, suplementados con forraje proveniente del TUT BF y silaje de yuca u otro suplemento elaborado en la finca. Durante el período evaluado, los becerros se destetaron aproximadamente a los cinco meses de edad. Las hembras se mantuvieron en el rebaño y los machos se vendieron luego del destete o al cumplir un año de edad.

Las hembras en crecimiento (> de un año de edad) se manejaron en pastoreo rotativo en el TUT PAD con una carga animal promedio de 1,5 UA ha⁻¹. Según las pautas de manejo de la finca, estas son seleccionadas, y a partir de los 320 kg de peso vivo se realiza su revisión ginecológica para ser llevadas a servicio o vendidas. Las novillas preñadas a partir de los 7 meses de gestación se incorporan con el grupo de vacas en producción.

Los animales se suplementaron de acuerdo a su estado fisiológico y en cantidades ya pre-establecidas según el manejo de la finca. Se utilizó forraje de *G. sepium* y silaje elaborados con yuca (raíz + follaje), sorgo y caña de azúcar y canavalia, suministro de frutos molidos de palma africana y bloques multinutricionales *ad libitum*. Además, se suministra sal y minerales durante todo el año. A las vacas en producción se les ofrece cogollo de caña de azúcar procedente del TUT CAZ.

En las vacas se realizan revisiones ginecológicas periódicas por parte de un médico veterinario y se llevan registros reproductivos con los que se determinó el intervalo entre partos (IEP) y el porcentaje de pariciones del rebaño. De igual manera, se aplicó un plan de manejo sanitario preventivo de acuerdo con las pautas establecidas por el Instituto Nacional de Salud Agrícola Integral (INSAI) de Venezuela.

En cuanto al manejo del estiércol, y en concordancia con las directrices establecidas por el IPCC (2006), en la finca se identificaron dos sistemas de manejo: a) el estiércol se deja en las áreas de pastoreo tal como lo distribuyen los animales y no se maneja y b) el estiércol de los corrales es recolectado diariamente y mezclado con otros residuos orgánicos y sometido a compostaje en pilas bajo manejo extensivo. Posteriormente, el compost generado es aplicado en los cultivos y pasturas para su fertilización.

Las salidas del sub-sistema bovinos doble propósito son: leche para la venta o procesada en la finca para la elaboración de queso, lactosuero, venta de animales en pie (vacas de descarte, toro de reemplazo, becerros al destete, mautas y novillas para cría) y excretas para compostaje y producción de abono orgánico.

3.6.2 Mediciones y determinaciones

En el sub-sistema bovinos doble propósito se realizaron diferentes mediciones por cada componente, que permitieron generar indicadores que luego se utilizaron para la estimación de las emisiones de GEI. Las variables evaluadas y su frecuencia de medición se resumen en el Cuadro 7 y se describen a continuación.

a. Animales

La producción de leche vendible se determinó diariamente mediante el pesaje en balde durante el ordeño, y la fracción consumida por el becerro una vez por semana a través del método de doble pesaje (antes y después del amamantamiento) en los dos ordeños diarios. A partir de estas mediciones se determinó la producción total de leche mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{PTL = PLV + LCB} \qquad \mathbf{[Ecuación 21]}$$

Donde: PTL es la producción total de leche por vaca (kg día^{-1}), PLV es la producción de leche vendible (kg día^{-1}) y corresponde a la leche pesada en el ordeño y LCB es la leche consumida por el becerro (kg día^{-1}). Con los datos generados, se determinó la producción total de leche y leche vendible por lactancia por vaca ($\text{kg vaca}^{-1} \text{lactancia}^{-1}$).

Para determinar la calidad de la leche se tomaron tres muestras de leche después del ordeño, durante tres días consecutivos y se enviaron al laboratorio de la Cátedra de la Industria de la leche en la Facultad de Ciencias Veterinarias de la UCV en Maracay, Estado Aragua. Esta información se complementó con datos generados en el período 1998-2004, y se obtuvo el valor promedio y la desviación estándar para los parámetros grasa, proteínas y sólidos totales de la leche.

Cuadro 7. Variables evaluadas en el sistema bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Componente	Variable	Frecuencia
Vacas	Producción de leche (kg vaca ⁻¹)	Diaria
	Condición reproductiva	Trimestral
Vacas y toro	Peso vivo (kg) y condición corporal	Mensual
Animales en crecimiento post-destete	Peso vivo (kg)	Quincenal
	Peso al nacimiento (kg)	Al nacer
Terminos	Consumo de leche (kg día ⁻¹)	Semanal
	Peso vivo (kg)	Semanal
Leche	Grasa, proteínas y sólidos totales (%)	Trimestral
Pasturas y árboles forrajeros	Disponibilidad de biomasa (kg MS)	Mensual
	Análisis bromatológico y digestibilidad	Por época
Suplementos	Cantidad suministrada (kg día ⁻¹)	Semanal
	Análisis bromatológico y digestibilidad	Por época
Sistema	Labores y tiempo de uso de la maquinaria agrícola	Según ocurrencia
	Cantidad de fertilizante químico y orgánico aplicado	Según ocurrencia

El peso de los animales en crecimiento se determinó al nacer, posteriormente semanalmente y el de las vacas y el toro mensualmente con una balanza digital portátil (Ruddweigh, modelo KM-2 E, con precisión de $\pm 0,5$ kg). La ganancia diaria de peso de los animales en crecimiento se estimó por regresión lineal (Steel y Torrie 1996).

b. Gramíneas, árboles forrajeros y suplementos

La disponibilidad de biomasa de las pasturas se determinó mensualmente antes de la entrada de los animales a los potreros 1, 2 y 3 del TUT PCL: a) para las gramíneas, se realizó un muestreo al azar de 20 puntos con una cuadrícula de 0,25 m² en cada unidad de pastoreo, cosechando a 5 cm de altura del suelo, b) para *L. leucocephala* se muestrearon al azar 20 plantas, se cosechó y seleccionó el forraje verde aprovechable (hojas y tallos verdes) y se pesó en fresco.

Una vez por semana, durante la suplementación de los animales, se estimó el consumo de los suplementos (silaje, forraje de *G. sepium*, fruto de palma africana) y cogollo de caña de azúcar, mediante la diferencia de peso entre las cantidades ofrecidas y rechazadas (en los casos en que las hubo), luego los valores fueron ajustados de acuerdo al contenido de MS de los alimentos.

En todos los casos (forrajes y suplementos), se tomaron muestras que fueron secadas en estufa a 65 °C durante 48 horas o hasta alcanzar peso constante, luego se determinó el contenido de MS y se almacenaron en envases herméticamente cerrados. Posteriormente, fueron enviadas al laboratorio para determinar su valor nutritivo y digestibilidad.

c. Análisis de laboratorio

Las muestras de forrajes y suplementos se agruparon por especie, tipo de suplemento y época (seca y lluviosa) y se enviaron al laboratorio de Nutrición Animal del INIA en Maracay, Estado Aragua. Se determinó: materia seca, ceniza, proteína cruda, fibra cruda y extracto etéreo por el método de Weende (AOAC 1990); P por el método colorimétrico, Ca por absorción atómica (AOAC 1990), energía por el método Parr 1261, fibra detergente ácida por el método de Van Soest (1970) y digestibilidad *in situ* por la técnica de la bolsa de nylon (Orskov et ál. 1980, Kempton 1980).

d. Sistema

- **Consumo de combustibles y lubricantes por maquinaria y equipo agrícola**

En el MF-ATS se utiliza maquinaria agrícola procedente de la Fundación Danac para actividades como transporte, labranza y control mecánico de malezas. También, se utilizan desmalezadoras para el control de malezas en áreas de cultivo y mantenimiento de cercas y áreas de pastoreo. Mediante los registros de labores agrícolas de la finca y mediciones de campo se estimó el tiempo de uso de la maquinaria agrícola y equipos en los componentes asociados al sub-sistema bovinos doble propósito y luego se determinó el consumo de combustibles (gas-oil y gasolina) y lubricantes (aceite de motor).

Para estimar el consumo de combustible se consideró la premisa señalada por Dávila (2005), quien afirma que la cantidad de combustible gastado por un motor de una máquina agrícola en una actividad determinada depende del tipo de combustible utilizado y de la carga ejercida sobre el motor.

En tractores (motor diesel), el consumo de combustible (gas oil) fue determinado por el método de eficiencia del combustible (Hunt 2001, Dávila 2005), en el que se considera el consumo específico de combustible y la carga ejercida en base a la potencia a la toma de fuerzas del tractor. Esta última, es variable dependiendo de las labores realizadas. Bajo estas premisas, el consumo de combustible se estimó con la siguiente ecuación:

$$CCt_i = (Pt_i \times (Ef_i/100) / Cec) \times Tm_i \quad \text{[Ecuación 22]}$$

Donde: CCI es el consumo de combustible del tractor en la labor I ($L h^{-1}$), Pt es la potencia nominal del tractor i (kW), Ef es la eficiencia de uso del combustible en la labor I, Cec es el consumo específico de combustible ($Kw-h L^{-1}$) a la eficiencia de uso de la máquina y Tm es el tiempo de uso de la maquinaria en la labor I (horas).

Para los cálculos se utilizaron valores de eficiencia de campo en labores mecanizadas estimadas para Venezuela (Dávila 2005) y valores de consumo específico de combustible sugeridos por Hunt (2001); estos últimos basados en resultados obtenidos en las pruebas de Nebraska.

El consumo promedio de lubricante ($L h^{-1}$) para el motor se estimó a partir de las recomendaciones de Hunt (2001), en las que se considera la potencia nominal máxima aplicada a la toma de fuerzas del tractor y la capacidad del carter del motor.

En el caso de las desmalezadoras, por poseer motor de dos tiempos, el cual funciona con una mezcla de gasolina – aceite, el consumo se estimó de la siguiente manera:

- a. Se determinó la capacidad real (Cr) del equipo. Para ello se realizaron mediciones del tiempo efectivo de uso del equipo (en minutos) y la superficie laborada (en m^2) bajo diferentes condiciones de desarrollo de las malezas. Luego, se obtuvo la Cr como el cociente entre la superficie laborada y el tiempo de labor. Se calculó el valor promedio y se expresó en hectárea por hora ($ha h^{-1}$).
- b. Estimación del consumo de combustible de referencia (CCr) del equipo. Para ello se determinó el gasto de la mezcla gasolina-aceite como la diferencia entre el volumen de mezcla colocada en el tanque del equipo antes de iniciar la labor y el volumen sobrante al final de la labor. Simultáneamente, se midió el tiempo de uso del equipo y mediante el coeficiente entre el volumen de mezcla gastado y el tiempo de labor se obtuvo el CCr ($L h^{-1}$).
- c. Posteriormente, en las labores habituales de campo, se midió el tiempo de uso del equipo por actividad (Te). Con los datos generados en los incisos a y b, y conociendo Te , se estimó el consumo de la mezcla gasolina-aceite, mediante la siguiente ecuación:

$$CMd_i = (CCr/Cr) \times (Te_i \times Cr) \quad \text{[Ecuación 23]}$$

Donde: CMd es el consumo de la mezcla gasolina-aceite por el equipo en la labor I (L), CCr es el consumo de combustible de referencia ($L h^{-1}$), Cr es la capacidad real del equipo en la labor y Te es el tiempo de uso del equipo en la labor I (h).

Posteriormente, a partir del valor de CMd y conociendo la relación combustible – aceite en la mezcla, se determinó el consumo de cada componente (L). El consumo total de combustible y lubricante de la maquinaria y equipo estimado por año ($L \text{ año}^{-1}$) se expresó en $GJ \text{ año}^{-1}$ mediante la siguiente ecuación:

$$CCue = CC_{t,d} \times PE_{comb_i} \times VCN_i \times 10^3 \quad \text{[Ecuación 24]}$$

Donde: CCue es el consumo de combustible en unidades de energía (GJ), CC es el consumo de combustible del tractor t o la desmalezadora d (L año⁻¹), PEcomb es el peso específico del combustible i (kg L⁻¹) y VCN es el valor calórico neto del combustible i (TJ Gg⁻¹)¹¹.

- **Uso de fertilizantes químicos y orgánicos**

En términos generales, la agricultura desarrollada en el MF-ATS se considera de bajos insumos en lo referente a la utilización de agroquímicos, por lo que no se utiliza ningún tipo de plaguicida en la finca. Los usos de la tierra identificados con uso de abono (químico u orgánico) fueron CAZ y PCL. Mediante los registros de campo y mediciones se cuantificaron las cantidades de abonos químicos y orgánicos aplicados en los cultivos y áreas de pastoreo durante un año.

3.6.3 Curva de lactancia

Para caracterizar la curva de lactancia de las vacas del rebaño de bovinos doble propósito se tomaron en consideración 110 lactancias completas, basadas en registros diarios de producción y correspondientes al período 1998-2005. Estas fueron clasificadas en cinco grupos (Anexo 3) de acuerdo al nivel de producción total de leche (leche vendible + leche consumida por el becerro) y se evaluaron para tres frecuencias de medición de leche (7, 14 y 28 días).

Para generar la curva de lactancia se utilizó el modelo Gamma incompleta propuesto por Wood (1967):

$$Y_t = a \times t^b \times e^{-c \times t} \quad \text{[Ecuación 25]}$$

Donde: Y_t es la producción diaria (kg día⁻¹) en el período t (días), a es el parámetro de la curva que regula la producción inicial, b es el parámetro que regula el ascenso al pico de producción, c es el parámetro que regula el descenso postpico de producción y e es la base de los logaritmos naturales.

¹¹ 1 TJ = 10¹² J, 1 GJ = 10⁹ J y 1 Gg = 10⁹ g

El modelo fue aplicado mediante el método de estimación no lineal de mínimos cuadrados (Mardquart 1970) a través del procedimiento NLIN del programa SAS (SAS Institute 1988). De las ecuaciones generadas se seleccionó la de mayor aproximación al promedio de producción total de leche del rebaño durante el período 1998 – 2005, alto valor de R^2 y menor valor del CME y se utilizó posteriormente en el Modelo *LIFE SIM* (León-Velarde et ál. 2006) para estimar las emisiones de metano por vacas en producción.

3.7 Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero

Para la estimación de las emisiones de GEI en el sistema evaluado se consideraron los siguientes supuestos: Las emisiones de CO_2 provocadas por el ganado no se estimaron ya que se asumió que las emisiones anuales netas de CO_2 equivalen a cero, debido a que el CO_2 de la fotosíntesis de los vegetales retorna a la atmósfera como CO_2 respirado (IPCC 2006). Tampoco se consideraron las emisiones generadas por el transporte en vehículo ya que su asignación es puntual, y su uso es compartido con otras actividades institucionales, en las cuales se emplea por mayor tiempo. No se consideró el consumo de energía eléctrica para el cálculo de emisiones debido a que en Venezuela más del 70% de la energía eléctrica consumida en el país proviene de fuentes hidráulicas (MARN-PNUD-GEF 2005), por lo tanto se estimó que en el MF-ATS se utilizó energía limpia.

Haciendo la abstracción en el sistema de producción (MF-ATS), se delimitaron los componentes y procesos vinculados al subsistema bovinos doble propósito del MF-ATS, se separaron los componentes asociados al subsistema cerdos y al subsistema espacio doméstico rural, y se estimaron las emisiones de GEI generadas por la producción bovina.

En el caso del cultivo de caña de azúcar (TUT CAZ), por ser un componente en el cual sus productos se fraccionan y comparten para la alimentación de aves, cerdos y bovinos (ver punto 3.2.1.4); se estimó la fracción de biomasa aprovechada en cada subsistema (bovinos

doble propósito y cerdos) por lo que se calculó un factor de utilización de la biomasa comestible del cultivo de caña de azúcar para cerdos y bovinos ($FUB_{CAZc,b}$)¹².

En la estimación del FUB_{caz} no se tomó en consideración el aprovechamiento por las aves de corral debido a que el consumo reportado por Ruiz-Silvera et ál. (2008) de $0,29 \text{ t MS año}^{-1}$ para la parvada de animales manejada en el MF-ATS, representó el 0,6% de la biomasa total comestible producida en el año 2005; considerándose bajo al ser comparado con el consumo de las otras dos especies animales.

El FUB_{caz} se aplicó para diferenciar del total anual de emisiones de GEI del TUT CAZ (debidas al uso de maquinaria y equipos agrícolas y a la aplicación de fertilizantes en el cultivo), la proporción correspondiente al subsistema bovinos doble propósito.

Para estimar las emisiones de CH_4 procedentes de la fermentación entérica se aplicó la metodología del IPCC (2006) en los niveles 2 y 3. También, se utilizó el modelo *LIFE SIM* (Dairy v.8.0), que además de estimar las emisiones de CH_4 , permitió estimar la cantidad de excretas producidas por los animales y el contenido de nitrógeno en éstas (León-Velarde et ál. 2006). En ambas metodologías se consideraron los parámetros productivos y reproductivos obtenidos en la caracterización del rebaño bovino para el período 2003-2005; además, de las variables climáticas del sitio de estudio.

3.7.1 Emisiones de metano por fermentación entérica

Para determinar las emisiones de CH_4 en los rumiantes se estimó el consumo potencial de materia seca por animal; la oferta promedio de energía bruta, proteína cruda y la digestibilidad de la dieta de los diferentes grupos de animales por época (seca y lluviosa). De acuerdo con las directrices del IPCC (2006) las emisiones de CH_4 por fermentación entérica se estimaron aplicando un método de nivel 2. En este caso, se generaron los factores de emisión y se dispuso de los datos de la actividad en forma detallada.

¹² $FUB_{CAZc,b}$: Factor de utilización de la biomasa comestible generada por el cultivo de caña de azúcar en cerdos y bovinos.

Las emisiones de CH₄ se estimaron considerando las siguientes ecuaciones:

$$E_{(fe)} = FE_{(fe)} \times \text{Población} / (10^3 \text{ kg t}^{-1}) \quad \text{[Ecuación 26]}$$

Donde: E_(fe) son las emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica (t CH₄), FE_(fe) es el factor de emisión entérica de una categoría de animales (kg CH₄ animal⁻¹ año⁻¹) y población es el número de animales de una determinada categoría.

$$FE = (EB \times Ym \times Nd) / (55,65 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ CH}_4) \quad \text{[Ecuación 27]}$$

Donde: FE es el factor de emisión (kg CH₄ animal⁻¹ año⁻¹), EB es la absorción de energía bruta (MJ animal⁻¹ día⁻¹), Ym es la tasa de conversión del metano, que es la fracción de energía bruta presente en los alimentos que se convierte en CH₄ y Nd es el número de días del ciclo de la estimación. Para este estudio se asumió un valor de Ym de 0,060 (IPCC 2006).

De acuerdo con el IPCC (2006), para los animales en crecimiento que sólo consumen leche se consideró que la tasa de conversión del CH₄ es igual a cero (Ym=0), por tanto no emiten metano por fermentación entérica. Esta consideración se aplicó para todos los animales menores de tres meses de edad. Sin embargo, la edad al destete promedio observada para el período evaluado fue de 5,3 meses.

En el Cuadro 8 se presentan las ecuaciones y factores utilizados para la estimación de la energía bruta (EB) requerida por las diferentes categorías de animales identificadas en el rebaño, en función del valor nutritivo y la digestibilidad de la dieta consumida por éstos.

Cuadro 8. Ecuaciones y coeficientes utilizados para estimar el consumo de energía bruta por bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Parámetro / Ecuación	Descripción
1. Energía neta de mantenimiento (EN _m) (MJ día ⁻¹) $EN_m = CF_i \times (PV)^{0,75}$	CF= Coeficiente para el calculo de EN _m (Vacunos en lactancia = 0,335, Vacunos no lactantes = 0,322) PV : Peso vivo del animal (kg)
2. Energía neta de actividad (EN _a) (MJ día ⁻¹) $EN_a = C_a \times EN_m$	EN _a (MJ día ⁻¹) C _a =Coeficiente para condiciones de alimentación del animal. Pastoreo de vacunos en áreas de alta disponibilidad de forraje = 0,17
3. Energía neta de crecimiento (EN _c) (MJ día ⁻¹) $EN_c = (4,18 \times \{0,0635 \times [0,891 \times (PV \times 0,96) \times (478 / (C \times PC))]\}^{0,75} \times (GDP \times 0,92)^{1,097})$	PV= Peso vivo del animal (kg) PC= Peso corporal adulto (kg) C= Coeficiente 0,8 hembras, 1,0 animales castrados, 1,2 toros (NCR 1996) GDP= ganancia de peso (kg día ⁻¹)
4. Energía neta de pérdida de peso (EN _{mov}) (MJ día ⁻¹) (Vacas en periodo de lactancia) $EN_{mov} = 19,7 \times \text{Pérdida de peso}$	Pérdida de peso= Peso que pierde el animal durante la lactancia (kg día ⁻¹)
5. Energía neta para lactancia (EN _i) (MJ día ⁻¹) $EN_i = \text{kg de leche día} \times (1,47 + 0,40 \times \text{Grasa})$	Grasa=Contenido de grasa de la leche (%)
6. Energía neta preñez (EN _p) (MJ día ⁻¹) $EN_p = C_{preñez} \times EN_m$	C _{preñez} =Coeficiente de preñez. En vacunos C _{preñez} = 0,10 EN _m = Energía de mantenimiento (MJ día ⁻¹)
7. Relación entre la energía neta en una dieta de mantenimiento y energía digestible consumida (EN _{ma} /ED) $EN_{ma}/ED = 1,123 - (4,092 \times 10^{-3} \times ED) + [(1,126 \times 10^{-5} \times (ED)^2)] - (25,4/ED)$	ED= energía digestible expresada en % de la energía bruta
8. Relación entre la energía neta disponible para el crecimiento en una dieta y la energía digestible consumida (EN _{cre} /ED) $EN_{ma}/ED = 1,164 - (5,160 \times 10^{-3} \times ED) + (1,308 \times 10^{-5} \times (ED)^2) - (37,4/ED)$	ED= energía digestible expresada en % de la energía bruta
9. Energía bruta (EB) (MJ día ⁻¹) ^a $EB = \{[(EN_m + EN_{mov} + EN_a + EN_i + EN_p) / (EN_{ma}/ED)] + [(EN_c + EN_{lana}) / (EN_{cre}/ED)]\} / (ED/100)$	Los términos en la ecuación corresponden a las ecuaciones precedentes de este cuadro

Donde: ^aSe utilizaron los términos que corresponden a cada categoría de animales.

Fuente: IPCC (2006).

3.7.2 Emisiones de metano por manejo del estiércol

Para la estimación de de las emisiones de metano por manejo del estiércol se utilizó la metodología de sugerida por el IPCC (2006). Para ello, se aplicaron las ecuaciones que se indican posteriormente. Los factores utilizados para la estimación de las emisiones de CH₄ y N₂O por manejo del estiércol, no descritos en el texto, se resumen en el Cuadro 9.

$$E_{(me)} = FE_{(me)(i)} \times \text{Población} / (10^3 \text{ kg t}^{-1}) \quad \text{[Ecuación 28]}$$

Donde: E_(me) son las emisiones de CH₄ procedentes del manejo del estiércol de los animales de la categoría i (t CH₄), FE_(me) es el factor de emisión de CH₄ por manejo del estiércol de la categoría de animales i (kg CH₄ animal⁻¹ año⁻¹) y población es el número de animales de dicha categoría.

El factor de emisión de CH₄ (FE_(me)) procedente del manejo del estiércol se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$FE_{(me)} = [(SV_i \times Nd) \times (Bo_i \times 0,67) \times \Sigma(jk)(FCM_{jk}/100) \times SM_{ijk}] \quad \text{[Ecuación 29]}$$

Donde: FE_(me) es el factor de emisión de CH₄ de un animal de la categoría i (kg CH₄ por ciclo o por año), SV_i son los sólidos volátiles excretados por el animal por día en la categoría i (kg MS animal⁻¹ día⁻¹), Nd es el número de días del ciclo de la estimación, Bo_i es la capacidad máxima de producción de CH₄ del estiércol de un animal en la categoría i (m³ kg⁻¹ de SV), 0,67 es el factor de conversión de m³ de CH₄ a kg de CH₄, FCM_{jk} son los factores de conversión del CH₄ para cada sistema j de manejo del estiércol, por zona climática k (%) y SM_{ijk} es la fracción del estiércol de la categoría de animales i, tratado con el sistema de manejo j.

Para el estiércol de los bovinos, manejado en los sistemas pastura y compostaje extensivo, se estimó el factor SM para cada sistema. Para ello se consideró el tiempo de permanencia anual de cada categoría de animales en los corrales y luego, al relacionarlo con el tiempo total se generó la fracción de tiempo que los animales permanecen en los potreros y en los corrales. Con este factor, y asumiendo que las excreciones de los animales se producen a diferentes horas del día, se estimó la proporción de las excretas dejadas diariamente en el potrero y las dejadas en los corrales. De esta forma, se obtuvo la corrección por sistema de

manejo del estiércol de bovinos en el MF-ATS. La tasa de excreción de sólidos volátiles se estimó de la siguiente manera:

$$SV = [EB \times (1 - (ED/100)) + (EU)] \times [(1 - (Ceniza/100))/VCD] \quad \text{[Ecuación 30]}$$

Donde: SV es la excreción de sólidos volátiles por día en base a la materia orgánica seca (kg SV día⁻¹), EB es la energía bruta ingerida (MJ día⁻¹), ED es la energía digestible del alimento (%), EU es la energía urinaria (MJ día⁻¹), Ceniza, es el contenido de cenizas del estiércol (%) y VCD es el valor calórico de la dieta (MJ kg⁻¹ MS). La energía urinaria se estimó como una fracción de la EB:

$$EU = 0,04 \times EB \quad \text{[Ecuación 31]}$$

3.7.3 Emisiones de óxido nitroso por manejo del estiércol

Las emisiones de N₂O procedentes del manejo del estiércol se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$N_2O_{D(me)} = [(Población(i) \times N_{ex}(i) \times \sum(jk) MS(i,j)) FE_3(s)] \times (44/28) \quad \text{[Ecuación 32]}$$

Donde: N₂O_{D(me)} son las emisiones directas de N₂O debidas al manejo del estiércol de los animales de la categoría i (kg N₂O por ciclo o por año), población es el número de animales de la categoría i, N_{ex} es el valor promedio de excreción de N por animal de la categoría i (kg N animal⁻¹), MS(i,j) es la fracción de la excreción total de nitrógeno de los animales de la categoría i que se maneja en el sistema de gestión del estiércol j, FE₃(s) es el factor de emisión para emisiones directas de N₂O del sistema de manejo del estiércol s (kg N₂O-N kg N⁻¹) en el sistema de manejo del estiércol j y 44/28 es la conversión de emisiones de N₂O-N(me) a emisiones de N₂O_(me).

La tasa de excreción de nitrógeno se estimó a partir de la ingesta de nitrógeno para cada categoría de animales, mediante la siguiente ecuación:

$$N_{ex} = N_{ingesta}(i) \times (1 - N_{retención}(i)) \quad \text{[Ecuación 33]}$$

Donde: N_{ex} es la tasa de excreción de N por ciclo u año (kg N animal⁻¹) de animales en la categoría i, N_{ingesta}(i) es la ingesta anual de N por animal de la categoría i (kg N animal⁻¹ año⁻¹) y N_{retención}(i) es la fracción de la ingesta anual de N retenida por el animal de la categoría i.

Cuadro 9. Factores utilizados para el cálculo de emisiones de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso procedentes del manejo del estiércol de bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Factor	Condiciones	Valor	Fuente
B ₀ : Capacidad máxima de producción de CH ₄ del estiércol producido por el ganado	a) Vacas lactantes b) Otros vacunos	a) 0,13 m ³ CH ₄ kg ⁻¹ de SV b) 0,10 m ³ kg ⁻¹ CH ₄ de SV	IPCC 1996
FCM: Factor de conversión del CH ₄ para el sistema de manejo del estiércol en una región climática determinada	Clima: cálido Temp. prom. anual = 26 °C a) Sistema de pastoreo (FCM _p) b) Sistema de compostaje extensivo (FCM _{ce})	a) FCM _p = 2 % b) FCM _{ce} = 1,5 %	IPCC (2006)
Factor de conversión de volumen de CH ₄ a masa de CH ₄	No aplica	0,64 m ³ de CH ₄ kg de CH ₄	IPCC (2006)
SM: Fracción del estiércol del ganado manejado en el sistema i	Varía de acuerdo al manejo aplicado al estiércol en la finca para las diferentes categorías de animales. SM _p = Sistema pastura. SM _{ce} = Sistema compostaje extensivo	SM _p (v,t,b)= 0,83 SM _{ce} (v,t,b)= 0,17 SM _p (n-h1-2)=0,96 SM _{ce} (n-h1-2)=0,04	Cálculos propios
Cenizas del estiércol de vacunos	No aplica	8 %	IPCC (2006)
Nretención: Fracción de la ingesta anual de N retenida por el animal	a) Vacas lactantes b) Otros vacunos	a) 0,20 b) 0,07 (kg Nret. animal ⁻¹ año ⁻¹)(kg Ningesta N animal ⁻¹ año ⁻¹) ⁻¹	IPCC (2006)
Factor de ajuste para tasas de excreción de N en animales jóvenes	a) Ganado vacuno de 0-1 año b) Ganado vacuno de 1-2 años	a) 0,3 b) 0,6	IPCC (2006)
FE ₃ : Factor de emisión para emisiones directas de N ₂ O para el sistema de manejo del estiércol	De acuerdo al sistema de manejo del estiércol	FE ₃ (p) = 0,02 FE ₃ (ce) = 0,01 (kg de N ₂ O-N/kg de N excretado)	IPCC (2006)
Conversión de N ₂ O-N en N ₂ O		N ₂ O= N ₂ O-N x (44/28)	IPCC (2006)
FC: Fracción de carbono en pastos y suplementos		FC = 0,50	Brown y Lugo 1984, IPCC (1996)

Donde: Los factores referidos por el IPCC (2006) son de aplicación para América Latina.

3.7.4 Simulación con el Modelo *LIFE SIM*

La simulación con el software *LIFE SIM* se realizó tomando en consideración las mismas condiciones de manejo alimenticio aplicadas para las estimaciones realizadas por la metodología del IPCC (1996, 2006). Debido a que el modelo *LIFE SIM* (Dairy v.8.0) toma en consideración la edad y número de partos de las vacas se aplicó el siguiente procedimiento para la simulación:

- a. Se agruparon las vacas en producción por edad y número de partos y se determinó la proporción relativa de cada grupo de vacas en el rebaño (Cuadro 10).

Cuadro 10. Clasificación por edad y número de partos de vacas del rebaño de bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Grupo	Edad (años)	Partos	Proporción en el rebaño (%)
1	9	6	39
2	6	4	25
3	4	2	36

- b. Se realizaron simulaciones reiteradas para cada grupo de animales a fin de determinar la emisión de metano producto de la fermentación entérica, la producción de excretas y el contenido de N en las excretas. Estas simulaciones se manejaron bajo dos escenarios: 1) ocurrencia de partos en la época seca y 2) ocurrencia de partos a inicio de la época lluviosa. En ambos casos, con las estrategias de alimentación aplicadas en la finca para cada época del año.
- c. Los resultados generados (consumo de materia seca, CH₄ procedente de la fermentación entérica, excretas y cantidad de N por vaca por año) se procesaron y se obtuvo el promedio ponderado para cada variable. La ponderación tuvo por finalidad el ajuste de las variables de acuerdo a la dominancia de cada grupo en el rebaño.
- d. A partir de la cantidad de excretas y N presente en estas, se estimó la emisión de CH₄ y N₂O, mediante la aplicación de la metodología propuesta por el IPCC (2006).

3.7.5 Emisiones directas de óxido nitroso procedentes del suelo

El método descrito en las directrices del IPCC (2006) para la estimación de las emisiones directas de N₂O procedentes de los suelos agrícolas debido a la aplicación de N y a otras prácticas de manejo de cultivo considera los siguientes aportes de nitrógeno antropogénico: uso de fertilizantes (F_{SN}), cultivo de plantas fijadoras de N (fijación biológica de N, F_{BN}), incorporación de residuos de las cosechas a los suelos (F_{RC}) y la mineralización del nitrógeno del suelo debido al cultivo de suelos orgánicos (F_{SO}).

En lo concerniente a este estudio, se estimaron las emisiones directas producto de la aplicación de fertilizantes químicos y orgánicos, de la fijación biológica de nitrógeno por el cultivo de árboles leguminosos forrajeros (*G. sepium* y *L. leucocephala*) y de la incorporación de residuos de cosechas a los suelos. Estas emisiones se estimaron partiendo de la siguiente ecuación general:

$$\mathbf{N_2O-N_{Directo} = (F_{SN} + F_{EA} + F_{NB} + F_{RC}) \times FE_1} \quad \mathbf{[Ecuación 34]}$$

Donde: N₂O-N son las emisiones directas anuales de N₂O-N por aplicaciones de N a los suelos (kg N₂O-N año⁻¹), F_{SN} es la cantidad anual de N aplicado en los fertilizantes (fuentes nitrogenadas), F_{EA} es la cantidad anual de N aplicado en el abono orgánico (procedente del estiércol de los animales), F_{NB} es la cantidad de N fijado al suelo por árboles forrajeros, F_{RC} es la cantidad de N en residuos de cosechas reintegrados a los suelos y FE₁ es el factor de emisión para N₂O en las aplicaciones de N (kg de N₂O-N) (kg N de aplicaciones)⁻¹.

Para los cálculos se utilizó el factor de emisión (FE₁) de 0,0125 (kg de N₂O-N) (kg N aplicado)⁻¹ sugerido por el IPCC (2006). Para la conversión de los valores a N₂O se utilizó la relación peso molecular del N₂O-N/ peso molecular del N₂O (44/28).

El N fijado por los árboles leguminosos forrajeros (F_{NB}) se estimó para los TUT BF y PCL, por el cultivo de las especies *G. sepium* y *L. leucocephala*, respectivamente. Para estimar el N fijado por estas leguminosas se tomó como referencia un estudio realizado por Camacaro et ál. (2004) en un suelo Mollisol en zona de Bosque Seco Tropical en Maracay, Venezuela.

Basado en Camacaro et ál. (2004), los valores estimados en este estudio, se ajustaron de acuerdo con la densidad de población observada para *G. sepium* y *L. leucocephala* en los TUT BF y PCL, respectivamente.

En el caso del N aportado por los residuos de cosecha (F_{RC}), por su magnitud (20,7 t ha año⁻¹), se consideró la hojarasca generada por el cultivo de caña de azúcar, la fracción de N en la hojarasca se consideró similar al de la hoja, y para estimar la fracción de emisiones correspondientes al sub-sistema bovinos se multiplicó por el factor FUB_{CAZb} (Factor de utilización de la biomasa comestible generada por el cultivo de caña de azúcar), de manera de distribuir proporcionalmente las emisiones entre cerdos y bovinos.

En general, para estimar las emisiones de N_2O procedentes de los residuos de caña de azúcar se utilizó la siguiente ecuación:

$$N_2O-N_{CAZ} = (R_{CAZ} \times FN_{res} \times FE_1) \times FUB_{CAZb} \quad \text{[Ecuación 35]}$$

Donde: N_2O-N_{CAZ} son las emisiones directas anuales de N_2O-N procedentes de la descomposición de la hojarasca producida por el cultivo de caña de azúcar, R_{CAZ} representa los residuos del cultivo de caña de azúcar y es equivalente a la hojarasca generada anualmente (t ha año⁻¹), FN_{res} es la fracción de N presente en la hojarasca de caña de azúcar ($FN_{res} = 0,67$), FE_1 es el factor de emisión para N_2O en las aplicaciones de N (kg de N_2O-N) (kg N de aplicaciones)⁻¹ y FUB_{CAZb} es el factor de utilización de la biomasa comestible generada por el cultivo de caña de azúcar por bovinos ($FUB_{CAZb} = 0,26$).

3.7.6 Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del uso de combustibles fósiles

La estimación de las emisiones de GEI (CO_2 , CH_4 y N_2O) procedentes de la quema de combustible fósil debido al uso de maquinaria y equipo agrícola se realizó siguiendo la metodología de nivel 3 propuesta por el IPCC (2006).

Para el caso de tractores agrícolas se basó en los lineamientos establecidos para fuentes de combustión móvil¹³ y para desmalezadoras se aplicaron los lineamientos para fuentes de combustión estacionaria¹⁴. Para ambas fuentes, previamente se determinó el consumo de combustible y lubricante en unidades de energía (ver punto 3.5.2). Las emisiones de GEI se determinaron mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones}_{\text{GEI}} = \sum_{ij}(\text{Combustible}_{ij} \times \text{FE}_{ij}) \quad \text{[Ecuación 36]}$$

Donde: Emisiones_{GEI} es la cantidad emitida del gas (kg), Combustible_{ij} es el combustible j consumido por el motor i y FE_{ij} es el factor de emisión del motor i con el combustible j.

La estimación de emisiones de GEI por la maquinaria y equipo agrícola se realizó por separado y luego se sumaron para ser presentadas como emisiones de CO₂e (Mg año⁻¹). Los factores utilizados para estimar las emisiones de GEI por el uso de combustibles fósiles se indican en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Factores para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero por quema de combustibles fósiles.

Factor	Tipo de combustible o lubricante	Valor			Fuente
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
FE _{GEI} : Factor de emisión de GEI del combustible (kg GJ ⁻¹)	Gasolina	69,3	10,0	0,6	IPCC (2006)
	Gas oil	74,1	4,15	28,6	
	Aceite de motor	73,3	10,0	0,6	
VCN: Valor calórico neto (TJ Gg ⁻¹)	Gasolina		44,3		IPCC (2006)
	Gas oil		43,0		
	Aceite de motor		40,2		
Peso específico (kg L ⁻¹)	Gasolina		0,76		IPCC (2006)
	Gas oil		0,85		
	Aceite de motor		0,92		

A efectos de estimar la emisión de GEI por cada uso de la tierra asociado al subsistema bovinos doble propósito del MF-ATS, se calculó el aporte relativo de cada TUT al consumo

¹³ Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 2, Energía, capítulo 3, Combustión móvil.

¹⁴ Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 2, Energía, capítulo 2, Combustión estacionaria.

diario potencial de materia seca de cada grupo de animales y se obtuvo un factor de ponderación que posteriormente se aplicó al total de emisiones de CO₂e estimado. Luego, se distribuyeron las emisiones proporcionalmente entre los diferentes TUT evaluados.

3.8 Balance de gases de efecto invernadero

Para realizar el balance de GEI en el sub-sistema bovinos de doble propósito se consideraron las emisiones directas de los gases CO₂, CH₄ y N₂O, expresadas en términos de equivalentes de carbono (CO₂e); la fijación de carbono por parte de la biomasa aérea de los componentes leñosos estables y el suelo hasta 15 cm de profundidad. El bosque no fue considerado en el balance de GEI por considerarse su estabilidad.

En primera instancia se sumaron los aportes de los sumideros de carbono: a) suelo (carbono fijado), y b) árbol (biomasa aérea). Posteriormente, se sumaron las emisiones de GEI de las fuentes consideradas:

- a. Dióxido de carbono procedente de la descomposición de los residuos del cultivo de caña de azúcar y podas de *G. sepium* y *L. leucocephala* y del uso de combustible fósil.
- b. Metano procedente de la fermentación entérica y de las excretas de los animales y del uso de combustible fósil.
- c. Óxido nitroso procedente de las excretas, del N aplicado con los fertilizantes y de la fijación biológica por parte de las plantas leguminosas (*G. sepium* y *L. leucocephala*) y del uso de combustible fósil.

Para todas las estimaciones, los valores obtenidos de emisión y fijación por TUT fueron transformados a CO₂e de acuerdo a la relación que se presenta en el Cuadro 12. Posteriormente, se obtuvo el balance de GEI por TUT y a nivel del subsistema bovinos doble propósito como la diferencia entre fijación (sumideros) y las emisiones de las fuentes:

$$\text{Balance}_{\text{GEI sbdp}} = \sum \text{Fijación}_{ij} - \sum \text{Emisión}_{kj} \quad \text{[Ecuación 37]}$$

Donde: $\text{Balance}_{\text{GEI}^{\text{sbdp}}}$ es el balance de GEI en el subsistema bovinos doble propósito (t año^{-1}), Fijación_{ij} es la fijación de carbono (CO_2e) en el componente i del TUT (t año^{-1}) j y Emisión_{kj} representa las emisiones de GEI (CO_2e) procedentes de la fuente k en el TUT j (t año^{-1}).

Cuadro 12. Relación de CO_2 equivalente para metano y óxido nitroso.

Gas (kg)	Potencial de calentamiento global (kg de CO_2e) ^a
Dióxido de carbono (CO_2)	1
Metano (CH_4)	21
Óxido nitroso (N_2O)	310

Donde: ^a Para un horizonte de 100 años.

Fuente: IPCC (2006)

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Biomasa y carbono del componente arbóreo

4.1.1 Bosque primario

En el fragmento de bosque primario estudiado las familias botánicas predominantes fueron Fabaceae, Anacardiaceae, Rubiaceae, Bignoniaceae, Lecythidaceae, Acantaceae y Flacurtiaceae y las especies más abundantes fueron *Astronium graveolonens*, *Piptadenia pittieri*, *Psychotria occidentales*, *Gustavia yaracuyensis* y *Guazuma ulmifolia* (Anexo 4).

El patrón de distribución de los árboles del fragmento de bosque primario estudiado, mostró el predominio de latizales bajos ($dap \leq 4,9$ cm). Los árboles con dap de 10 a 30 cm presentaron una densidad promedio de 570 árboles ha^{-1} , mientras que en árboles con dap mayor a 30 cm fue de 90 árboles ha^{-1} . La altura promedio de los árboles con dap mayor a 5 cm estuvo en un ámbito de 7,80 y 22,22 m (Cuadro 13).

Cuadro 13. Distribución de clases diamétricas, diámetro, altura total y densidad de árboles en un fragmento de bosque primario, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Clase diamétrica (cm)	n	DAP ^a (cm)	Rango DAP (cm)	Altura (m)	Densidad (árboles ha^{-1})
$\leq 4,99^1$	105	$1,43 \pm 1,14$	0,20 - 4,20	$2,28 \pm 1,75$	19850 ± 9147
5,0 - 9,99	32	$6,62 \pm 1,31$	5,0 - 9,90	$7,80 \pm 1,52$	800 ± 924
10,0 - 29,99	57	$14,80 \pm 4,79$	10,0 - 29,90	$11,02 \pm 3,04$	570 ± 136
≥ 30	9	$54,08 \pm 28,85$	30,00 - 118,00	$22,22 \pm 7,85$	90 ± 60

Donde: ^a El DAP fue medido como diámetro basal en plantas con altura < 1,5 m.

La gravedad específica promedio estimada de la madera fue de $0,64 \pm 0,17$ $g\ cm^{-3}$ ($n=24$), con un rango entre especies de 0,25 a 0,98 $g\ cm^{-3}$, respectivamente. El menor valor estuvo referido a la especie *Ceiba pentandra* (Bombacaceae) y el mayor a *Swartzia lectopetala* (Fabaceae). El área basal de los fustes de los árboles con $dap \geq 10$ cm presentó alta variabilidad; su valor promedio fue de $36,7 \pm 29,8$ $m^2\ ha^{-1}$, con valores extremos de 10,7 y 77,2 $m^2\ ha^{-1}$.

4.1.2 Biomasa y carbono total del bosque primario

La biomasa aérea total estimada para el componente arbóreo del fragmento de bosque primario fue de $290,0 \pm 259,4$ Mg ha⁻¹; de esta un 95,7% se concentra en los individuos con dap ≥ 10 cm y sólo el 4,3 % en individuos con dap entre 5,0 y 9,9 cm; además, se observó una alta variabilidad en los valores obtenidos (Cuadro 14).

El carbono total almacenado en la biomasa aérea del bosque fue de $145,00 \pm 129,68$ Mg ha⁻¹ (Cuadro 14). El valor promedio de carbono total en la biomasa arriba del suelo concuerda con los resultados obtenidos por Delaney et ál. (1997) para una zona de transición entre bosque húmedo y bosque seco tropical en Venezuela ($148 \pm 19,1$ Mg ha⁻¹). Sin embargo, la variabilidad observada en este estudio fue mayor.

Cuadro 14. Biomasa aérea y carbono total almacenado según la clase diamétrica de árboles en un fragmento de bosque primario, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Clase diamétrica (cm)	Biomasa aérea (Mg ha ⁻¹)	Carbono total (Mg ha ⁻¹)
5,0 – 9,9	$12,43 \pm 7,63$	$6,21 \pm 3,82$
≥ 10	$277,57 \pm 262,06$	$138,78 \pm 131,03$
Total	$290,00 \pm 259,36$	$145,00 \pm 129,68$

4.1.3 Modelos alométricos para *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium*

4.1.3.1 Muestra de *Leucaena leucocephala*

La muestra de arbustos de *L. leucocephala* para el desarrollo de ecuaciones alométricas estuvo compuesta por 43 plantas distribuidas en cinco clases diamétricas; en cada una de ellas se consideraron 10 plantas, excepto en la categoría $\geq 8,1$ cm, en la cual, sólo se tomaron tres plantas por su baja presencia en el área de pastoreo. El Dcb₃₀ y el Dcp presentaron valores en un ámbito de 1,30 a 8,77 cm y 2,92 a 13,79 cm, respectivamente

(Cuadro 15). La Hpp y la Ht presentaron valores promedio de $0,98 \pm 0,10$ m y $2,44 \pm 0,5$ m, respectivamente.

La densidad observada de *L. Leucocephala* en el TUT PCL fue de 1861 ± 281 árboles ha^{-1} , lo cual reflejó una reducción aproximada del 45% con respecto a la población inicial plantada (3.333 árboles ha^{-1}) de esta leguminosa en el sistema.

Cuadro 15. Distribución por clases diamétricas y variables dasométricas de arbustos de *L. leucocephala* para la determinación de biomasa aérea en el TUT PCL, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Clase diamétrica (cm)	Dcb ₃₀ (cm)	Dcp (cm)	Hpp (m)	Ht (m)
< 2,0	$1,66 \pm 0,22$	$2,92 \pm 1,33$	$0,95 \pm 0,10$	$1,95 \pm 0,22$
2,1 – 4, 0	$3,03 \pm 0,71$	$6,97 \pm 3,08$	$0,94 \pm 0,10$	$2,22 \pm 0,16$
4,1- 6,0	$4,89 \pm 0,66$	$10,86 \pm 3,16$	$0,99 \pm 0,10$	$2,58 \pm 0,45$
6,1 – 8,0	$6,76 \pm 0,70$	$13,21 \pm 3,95$	$1,00 \pm 0,06$	$2,91 \pm 0,54$
$\geq 8,1$	$8,58 \pm 0,19$	$13,79 \pm 1,74$	$1,08 \pm 0,08$	$2,68 \pm 0,12$

Donde: Dcb₃₀ = diámetro cuadrático basal a 30 cm de altura, Dcp = diámetro cuadrático de la protuberancia del tallo, Hpp = altura al punto de poda y Ht = altura total de la planta.

4.1.3.2 Muestra de *Gliricidia sepium*

En el TUT BF, se obtuvo una ocupación del área de 68,8% y 31,2% para las plantas de *G. sepium* de 5 y 8 años de edad, respectivamente. Estos valores permitieron ajustar la densidad poblacional de *G. sepium*. Consecuentemente, y en el mismo orden, la densidad de población estimada fue de 4.440 ± 1194 y 889 ± 141 plantas ha^{-1} , respectivamente.

Los arbustos de *G. sepium* de 5 años de edad presentaron el Dcb₃₀ y Dcp con valores en un ámbito de 1,93 a 8,53 cm y 1,93 a 18,29 cm, respectivamente (Cuadro 16). Los valores promedio para Hpp y Ht fueron de $1,40 \pm 0,14$ m y $3,92 \pm 1,38$ m, respectivamente. Las variables dasométricas de las plantas de *G. sepium* de 8 años de edad fueron mayores que

las observadas en plantas de 5 años, tal como era de esperarse. El Dcb_{30} y Dcp presentaron valores en un ámbito de 3,67 a 13,63 cm y 9,80 a 26,41 cm, respectivamente (Cuadro 16). Los valores promedio para Hpp y Ht fueron $1,65 \pm 0,14$ m y $4,36 \pm 1,11$ m, respectivamente.

Cuadro 16. Distribución por clases diamétricas y variables dasométricas de plantas de *G. sepium* para la determinación de biomasa aérea por muestreo destructivo en el TUT BF, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Clase diamétrica (cm)	Dcb_{30} (cm)	Dcp (cm)	Hpp (m)	Ht (m)
Plantas 5 años (n=15)				
< 2,0	$1,93 \pm 0,12$	$1,93 \pm 0,59$	$1,18 \pm 0,06$	$1,94 \pm 0,35$
2,1 – 4, 0	$3,07 \pm 0,31$	$5,56 \pm 2,07$	$1,38 \pm 0,10$	$2,77 \pm 0,28$
4,1- 6,0	$5,33 \pm 0,64$	$10,07 \pm 2,34$	$1,51 \pm 0,04$	$4,91 \pm 0,52$
6,1 – 8,0	$6,83 \pm 0,65$	$14,98 \pm 2,17$	$1,45 \pm 0,09$	$4,82 \pm 0,06$
$\geq 8,1$	$8,53 \pm 0,47$	$18,29 \pm 4,77$	$1,50 \pm 0,10$	$5,15 \pm 0,22$
Plantas 8 años (n=18)				
2,1 - 4,0	$3,67 \pm 0,32$	$9,80 \pm 1,73$	$1,49 \pm 0,10$	$3,15 \pm 0,33$
4,1 - 6,0	$4,67 \pm 0,60$	$10,69 \pm 5,94$	$1,62 \pm 0,20$	$3,32 \pm 0,60$
6,1 – 8,0	$7,07 \pm 0,29$	$17,57 \pm 1,35$	$1,73 \pm 0,15$	$4,52 \pm 1,03$
8,1 – 10,0	$8,87 \pm 0,83$	$23,50 \pm 3,13$	$1,62 \pm 0,08$	$5,15 \pm 1,03$
10,1 – 12,0	$11,07 \pm 0,25$	$19,73 \pm 1,02$	$1,80 \pm 0,00$	$5,45 \pm 0,22$
> 12,1	$13,63 \pm 1,70$	$26,41 \pm 2,30$	$1,63 \pm 0,06$	$4,55 \pm 1,11$

Donde: Dcb_{30} = diámetro cuadrático basal a 30 cm de altura, Dcp = diámetro cuadrático de la protuberancia del tallo, Hpp = altura al punto de poda y Ht = altura total de la planta.

4.1.3.3 Modelos alométricos desarrollados para estimar la biomasa de *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium*

En el Cuadro 17 se presenta la matriz de coeficientes de correlación lineal para las variables biomasa del fuste y biomasa total con las variables dasométricas evaluadas en arbustos de *L. leucocephala*. La biomasa del tallo y la biomasa total presentaron una correlación alta, positiva y significativa con el Dcb₃₀, la cual es una variable generada a partir del diámetro basal del tallo o fuste principal de la planta. La correlación de la biomasa del tallo y la biomasa total con el Dcp y Ht tendió a ser menor, y más débil con las variables Hpp y número de ramas. Sin embargo, en todos los casos los coeficientes fueron altamente significativos ($p < 0,01$).

Cuadro 17. Matriz de correlación de Pearson de la biomasa del tallo, la biomasa total y las variables dasométricas evaluadas de *L. leucocephala* (n=43).

Variable	Dcb ₃₀	Dcp	Hpp	Ht	N° ramas
Biomasa tallo	0,95***	0,83***	0,48***	0,67***	0,71***
Biomasa total	0,93***	0,86***	0,46***	0,80***	0,62***

Donde: Dcb₃₀= diámetro cuadrático basal a 30 cm de altura, Dcp= diámetro cuadrático de la protuberancia del tallo, Hpp= altura al punto de poda y Ht= altura total de la planta. Valor de p: *** $p < 0,01$.

A partir de los resultados anteriores, se consideró a la variable Dcb₃₀ como predictora importante de la biomasa del tallo y de la biomasa total. Por lo tanto, se seleccionó como variable independiente para el desarrollo de las ecuaciones para predecir la biomasa en arbustos de *L. leucocephala*. Para el caso de *G. sepium*, la correlación entre las variables biomasa del tallo y biomasa total con las variables evaluadas determinó coeficientes significativos y positivos (Cuadro 18). Al igual que en el caso de *L. leucocephala*, los mayores valores observados para los coeficientes de correlación correspondieron a la variable Dcb₃₀ y los menores a Hpp y Ht.

Cuadro 18. Matriz de correlación de Pearson de la biomasa del fuste, biomasa total y las variables dasométricas evaluadas en *G. sepium* (plantas de 5 y 8 años de edad, n=33).

Variable	Dcb ₃₀	Dcp	Hpp	Ht	N° ramas
Biomasa tallo	0,96***	0,88***	0,62***	0,59***	0,67***
Biomasa total	0,93***	0,88***	0,58***	0,68***	0,73***

Donde: Dcb₃₀= diámetro cuadrático basal a 30 cm de altura, Dcp= diámetro cuadrático de la protuberancia del tallo, Hpp= altura al punto de poda, Ht: altura total de la planta. Valor de p: *** p<0,01.

Para el desarrollo de las ecuaciones de regresión para estimar la biomasa del tallo y la biomasa total de los arbustos de *L. leucocephala* y *G. sepium* se seleccionó el Dcb₃₀ como variable independiente por su fuerte relación con estas variables y se ajustó a un modelo potencia (Ketterings et ál. 2001):

$$Y = a X^b \quad \text{[Ecuación 38]}$$

El cual se expresa linealmente como:

$$\ln(Y) = \ln(a) + b \ln(X) \quad \text{[Ecuación 38.1]}$$

Donde: Y es la biomasa del tallo o biomasa total del arbusto (kg árbol⁻¹), a y b son los parámetros estimados del modelo y X es la variable independiente, representada en este caso por el diámetro cuadrático basal a 30 cm de altura del arbusto (Dcb₃₀ en cm).

En los Cuadros 19 y 20 se presentan los resultados obtenidos de la estimación de los modelos de regresión linealizados mediante transformaciones logarítmicas, sus estadísticos de ajuste y la precisión de la estimación para arbustos de *L. leucocephala* y *G. sepium*, respectivamente.

Las ecuaciones 1.1 y 1.2 (Cuadro 19) corresponden a los modelos generados para estimar la biomasa del tallo y biomasa aérea total de arbustos de *L. leucocephala*, respectivamente en el TUT PCL. En ambos casos, el modelo propuesto y sus parámetros fueron altamente significativos (p<0,01) y se obtuvieron coeficientes de determinación (R²) mayores a 0,96. Los valores de δB muestran que los modelos 1.1 y 1.2 subestiman la biomasa del tallo y biomasa total de las plantas de la muestra en 1,24% y 1,92%, respectivamente.

Cuadro 19. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa del tallo y la biomasa total de *L. leucocephala* en función del diámetro basal con sus estadísticos más importantes y la precisión de estimación.

Especie / Modelo	Coeficientes estimados ^a		F	Pr>F	R ²	CME	δB (%)
	a	b					
1.1. <i>L. leucocephala</i>	Ln(Btallo)=-2,9836+2,0428Ln(Dcb ₃₀) ^b						
	0,0506 *** (0,003)	2,0428 *** (0,043)	2285,84	< 0,0001	0,9824	0,0262	- 1,24
1.2. <i>L. leucocephala</i>	Ln(Btotal)=-2,3013+1,8655Ln(Dcb ₃₀) ^b						
	0,1001 *** (0,0076)	1,8655 *** (0,0526)	1256,05	< 0,0001	0,9684	0,0399	- 1,92

Donde: ^a Valor y error estándar entre paréntesis. ^b Expresión lineal del modelo tipo potencia obtenido mediante transformación logarítmica. Btallo= Biomasa del tallo, Btotal= Biomasa total y Dcb₃₀= diámetro cuadrático basal a 30 cm de altura. Valor de p: *** p<0,01.

En la Figura 8 se presenta la línea ajustada de los modelos alométricos generados para estimar la biomasa del tallo y la biomasa aérea total de *L. leucocephala*.

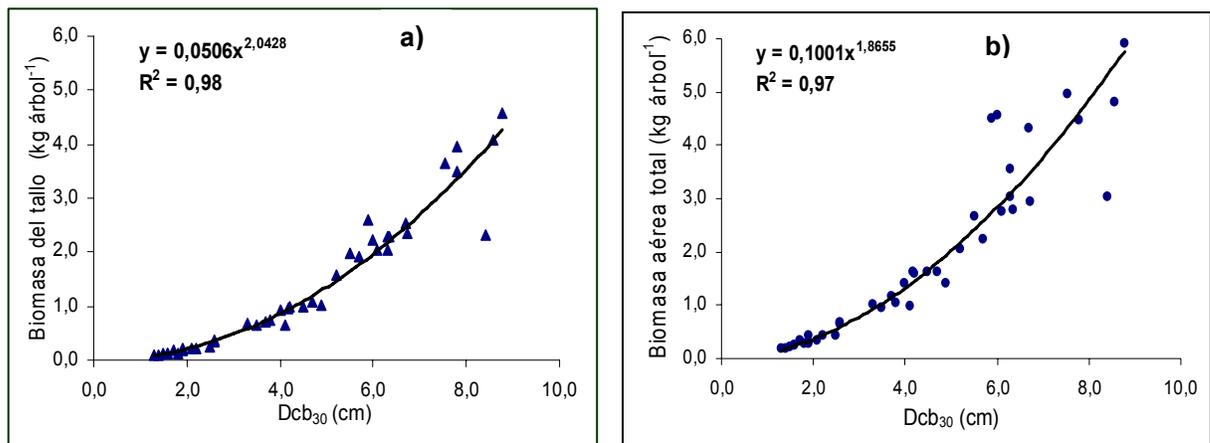


Figura 8. Relación entre el diámetro basal y a) biomasa observada del tallo, b) biomasa aérea total observada de arbustos de *L. leucocephala* en el TUT PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Para estimar la biomasa del tallo y biomasa aérea total de los arbustos de *G. sepium* en el TUT BF se generaron seis ecuaciones de regresión (Cuadro 20). Cuatro de estas ecuaciones se diferenciaron por la edad del arbusto (Ec. 2.1 a 2.4) y en las dos siguientes (Ec. 2.5 y 2.6) se utilizaron los datos de las plantas de ambas edades. Estas últimas, se

consideraron como ecuaciones alométricas mixtas (con base en la edad de la planta), por lo que el tamaño de la muestra obtenida para este caso fue de 33 observaciones.

En todas las regresiones el modelo utilizado y los coeficientes estimados fueron altamente significativos ($p < 0,01$). Las ecuaciones alométricas para las plantas de 5 años de edad (Ec. 2.1 y 2.2) mostraron el más alto coeficiente de determinación ($R^2 > 0,98$) y sobreestimaron la biomasa del tallo y la biomasa aérea total en 1,82% y 1,87%, respectivamente (Cuadro 20).

En el caso de las plantas de 8 años de edad, las ecuaciones alométricas 2.3 y 2.4 (Cuadro 20) mostraron coeficientes de determinación inferiores a los de las ecuaciones de plantas de 5 años. Sin embargo, estas también pueden considerarse apropiadas para la estimación de la biomasa porque los coeficientes de determinación obtenidos se ubicaron en un ámbito entre 0,93 y 0,96. Estos modelos sobreestimaron la biomasa en 1,93 y 4,38%, respectivamente.

Las ecuaciones alométricas mixtas (Ec. 2.5 y 2.6) aplicables para la estimación de la biomasa del tallo y la biomasa aérea total en plantas de ambas edades presentaron coeficientes de determinación sobre 0,96 y sobreestimaron la biomasa de los arbustos de la muestra en 3,09% y 4,54%, respectivamente (Cuadro 20).

Cuadro 20. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa del tallo y biomasa total de *G. sepium* en función del diámetro basal con sus estadísticos más importantes y la precisión de estimación.

Especie / Modelo	Coeficientes estimados ^a		F	Pr>F	R ²	CME	δB (%)
	a	b					
2.1. <i>G. sepium</i> (5 años)	Ln(Btallo)=-3,9881+2,5787Ln(Dcb ₃₀) ^b						
	0,0185 *** (0,003)	2,5787 *** (0,094)	754,33	< 0,0001	0,9831	0,0397	1,82
2.2. <i>G. sepium</i> (5 años)	Ln(Btotal)=-3,9500+2,8250Ln(Dcb ₃₀) ^b						
	0,0193 *** (0,0032)	2,8250 *** (0,0975)	840,22	< 0,0001	0,9848	0,0427	1,87
2.3. <i>G. sepium</i> (8 años)	Ln(Btallo)=-2,9745+2,1308Ln(Dcb ₃₀) ^b						
	0,0511 *** (0,009)	2,1308 *** (0,105)	413,77	< 0,0001	0,9628	0,0431	1,93
2.4. <i>G. sepium</i> (8 años)	Ln(Btotal)=-3,0407+2,2995Ln(Dcb ₃₀) ^b						
	0,0478 *** (0,0145)	2,2995 *** (0,1505)	233,36	< 0,0001	0,9358	0,0891	4,38
2.5. <i>G. sepium</i> (ambas edades)	Ln(Btallo)=-3,7067+2,4567Ln(Dcb ₃₀) ^b						
	0,0246 *** (0,004)	2,4567 *** (0,078)	998,66	< 0,0001	0,9698	0,0630	3,09
2.6. <i>G. sepium</i> (ambas edades)	Ln(Btotal)=-3,5795+2,5728Ln(Dcb ₃₀) ^b						
	0,0279 *** (0,0046)	2,5728 *** (0,0890)	835,70	< 0,0001	0,9642	0,0827	4,54

Donde: ^a Valor y error estándar entre paréntesis. ^b Expresión lineal del modelo tipo potencia obtenido mediante transformación logarítmica. Btallo= Biomasa del tallo, Btotal= Biomasa total y Dcb₃₀= diámetro cuadrático basal a 30 cm de altura. Valor de p: *** p<0,01.

Para estimar la biomasa del tallo y la biomasa aérea total de las plantas de *G. sepium* en el TUT BF se utilizaron las ecuaciones alométricas generadas de forma individual para plantas de 5 y 8 años de edad; ya que vistas en conjunto presentaron mayores valores de R², menores valores del CME y mayor precisión de la estimación (menor valor de δB) que las ecuaciones alométricas mixtas obtenidas (2.5 y 2.6). Sin embargo, considerando su significancia, estadísticos de ajuste y precisión, estas últimas también pudieron ser utilizadas en el caso de que en el campo no se hubiese observado una clara diferenciación entre las plantas de ambas edades.

En las Figuras 9 y 10 se aprecia la línea ajustada de los modelos alométricos generados para estimar la biomasa del tallo y la biomasa aérea total de los arbustos de 5 y 8 años de edad de *G. sepium*, respectivamente.

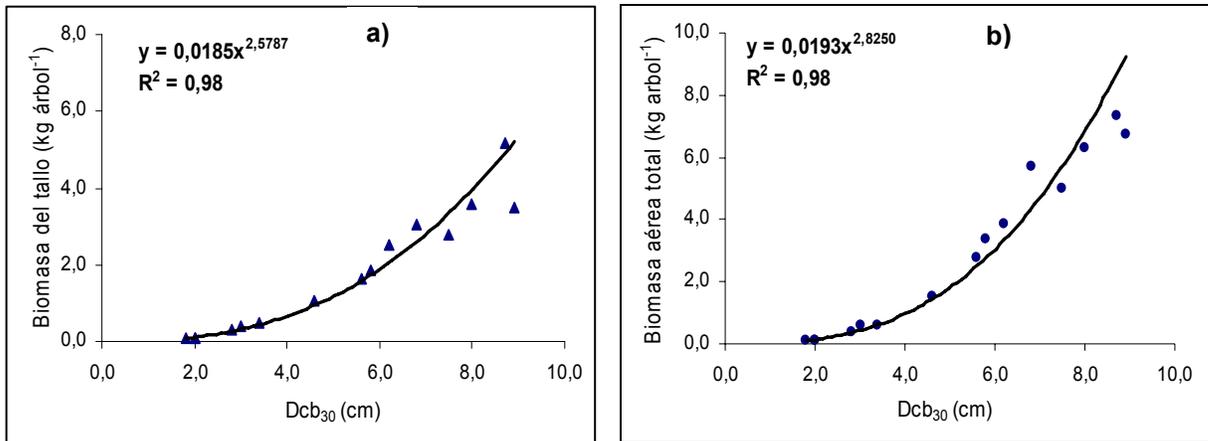


Figura 9. Relación entre el diámetro basal y a) biomasa observada del tallo, b) biomasa aérea total observada en arbustos de *G. sepium* de 5 años de edad, en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

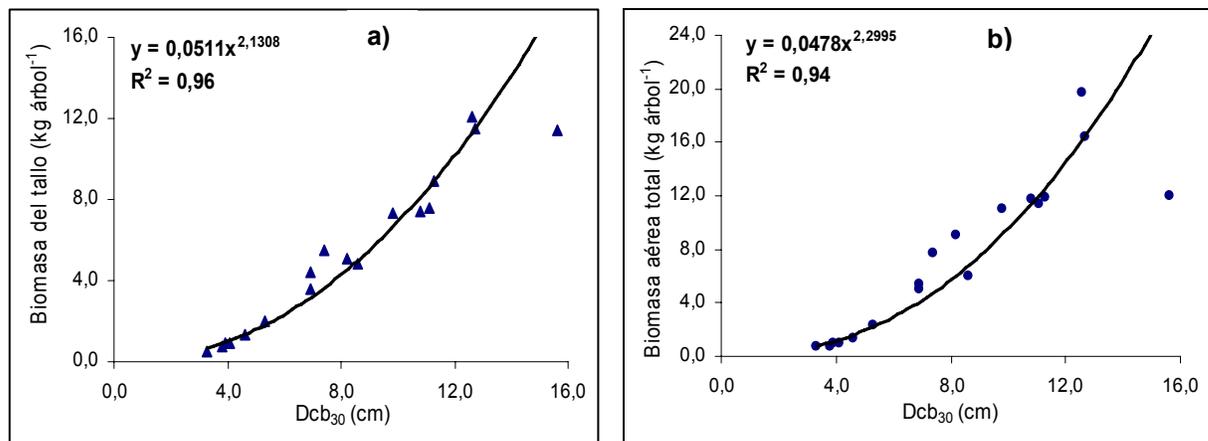


Figura 10. Relación entre el diámetro basal y a) biomasa observada del tallo, b) biomasa aérea total observada para arbustos de *G. sepium* de 8 años de edad, en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

4.1.4 Biomasa aérea y carbono total en pastura en callejones de *Leucaena leucocephala*

La biomasa aérea total y del tallo principal o fuste de los arbustos de *L. leucocephala* fue de $2,23 \pm 0,65 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $1,45 \pm 0,45 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente (Cuadro 21). Considerando que por efecto de manejo del TUT PCL la biomasa del tallo principal o fuste (estimado hasta el punto

de poda de la planta) es de carácter permanente y por encima del punto de poda (ramas y follaje) es temporal. Se consideró que en el TUT PCL se produce una remoción potencial de la biomasa de $0,78 \text{ Mg ha}^{-1}$, equivalente al 34,98% de la biomasa aérea total acumulada en las plantas de *L. leucocephala*.

Se estimó un rendimiento para *L. leucocephala* de $0,31 \pm 0,25 \text{ Mg MS ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$, equivalente al 13,9% de la biomasa aérea total; la cual representa la biomasa potencialmente ramoneada y consumida por los animales, y parcialmente exportada del sistema mediante su conversión en leche y carne. La remoción de la biomasa aérea de *L. leucocephala* es producida en primera instancia por el ramoneo al que es sometida la planta por los bovinos y luego por la poda correctiva que se aplica a los arbustos como parte de las prácticas de manejo establecidas en este sistema silvopastoril.

Debido al manejo, el follaje es consumido por los bovinos cada 37 ó 74 días (dependiendo de la época del año y el tiempo de ocupación del potrero). Además, se observó que algunas ramas de menor edad y diámetro son partidas por el ramoneo de los animales, provocando su caída. El resto de los tallos o ramas por encima del punto de poda son removidos con menor frecuencia, ya que la poda correctiva se aplica anual, y en algún caso bianual. Lo anterior, determina que una parte de las ramas se mantengan por mayor tiempo sin ser separadas de la planta, sugiriendo una aparente mayor permanencia del carbono total en esta fracción de *L. leucocephala*.

El carbono total almacenado en la biomasa aérea de *L. leucocephala* fue de $1,11 \pm 0,32 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $0,72 \pm 0,23 \text{ Mg C ha}^{-1}$ corresponden a la biomasa del tallo (Cuadro 21); siendo este último, el de mayor estabilidad en el sistema. A efectos de este estudio se consideró el carbono total almacenado en el tallo principal o fuste de la planta, por ser la fracción de mayor temporalidad en el sistema.

Cuadro 21. Biomasa aérea y carbono total en arbustos de *L. leucocephala* en el TUT PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Especie y edad (años)	Densidad (árboles ha ⁻¹)	Componente	Biomasa (Mg ha ⁻¹)	C total (Mg ha ⁻¹)
<i>L. leucocephala</i> (5)	1861 ± 280,51 (n = 400)	Planta entera ^a	2,23 ± 0,65	1,11 ± 0,32
		Tallo principal	1,45 ± 0,45	0,72 ± 0,23
		Ramas	0,79 ± 0,85	0,40 ± 0,43
		Forraje	0,31 ± 0,25	0,16 ± 0,13

Donde: ^a Biomasa total del arbusto arriba del suelo.

4.1.5 Biomasa aérea y carbono total en el banco forrajero de *Gliricidia sepium*

En el TUT BF para los arbustos de *G. sepium* de 5 años de edad la biomasa aérea total y la biomasa del tallo se estimaron en 7,77±1,87 Mg ha⁻¹ y 4,86±1,06 Mg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 22). La remoción potencial de la biomasa aérea de *G. sepium* se estimó en 2,91 Mg ha⁻¹, la cual es equivalente a 37,50% de la biomasa aérea total acumulada en esta leguminosa por ciclo. El rendimiento de *G. sepium* se estimó en 0,78±1,18 Mg MS ha⁻¹corte⁻¹, lo cual representa aproximadamente el 10% de la biomasa aérea total en los arbustos de 5 años de edad.

Los arbustos de *G. sepium* de 8 años de edad presentaron valores de biomasa aérea total y biomasa del tallo de 4,37±0,44 Mg ha⁻¹ y 3,28±0,30 Mg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 22). Estas variables fueron 43% y 33% inferiores a las observadas en plantas de 5 años, lo cual fue debido a la menor densidad de población que presentaron los arbustos de 8 años de edad en el sistema.

En las plantas de *G. sepium* de 8 años de edad se estimó una remoción de la biomasa aérea de 1,09 Mg ha⁻¹, equivalente a 24,9% de la biomasa aérea total. El rendimiento estimado para estos arbustos fue de 0,23±0,68 Mg MS ha⁻¹corte⁻¹, el cual equivale aproximadamente al 5,26% de la biomasa aérea total de *G. sepium*.

El carbono total almacenado en la biomasa aérea total de las plantas de *G. sepium* de 5 y 8 años de edad fue de $3,88 \pm 0,94 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $2,18 \pm 0,22 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente. De igual manera, el carbono almacenado en la biomasa del tallo de las plantas de *G. sepium* de 5 y 8 años de edad fue de $2,43 \pm 0,53 \text{ Mg ha}^{-1}$ y $1,64 \pm 0,15 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente (Cuadro 22).

Los resultados muestran que del carbono total almacenado en el sistema de forma estable (carbono del tallo principal), las plantas de *G. sepium* de 5 y 8 años de edad aportan el 59,7% y 40,3%, respectivamente. Lo que demuestra que a pesar de la baja proporción de plantas de 8 años de edad en el sistema (17% aproximadamente), su contribución al almacenamiento de carbono es importante y guarda relación con los valores obtenidos para las variables dasométricas observadas (Cuadro 16); las cuales, como era de esperarse fueron mayores para las plantas más longevas.

Aproximadamente el 67,10% de la biomasa aérea de la leguminosa se encuentra en el tallo principal (por debajo del punto de poda) y por efecto de manejo es de mayor temporalidad que el resto de la biomasa aérea de la planta. Expresado en términos de carbono total, se obtuvo que el TUT BF almacenó de manera permanente $4,07 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en la biomasa aérea de los arbustos de *G. sepium*, lo que equivale aproximadamente a dos tercios del carbono total observado en la parte aérea de estas leguminosas.

La biomasa por encima del punto de poda de las plantas de *G. sepium*, compuesta por ramas y follaje, se considera de carácter temporal por su remoción periódica debido a la poda a la que se someten los arbustos en el TUT BF. Estas dos fracciones de la planta tienen diferentes destinos dentro del sistema; en primer lugar se separa el follaje de las ramas leñosas y se utiliza en la suplementación de bovinos; posteriormente los tallos son distribuidos en el suelo entre las hileras del BF y en algunos casos, los de mayor grosor y longitud son seleccionados y extraídos como semilla vegetativa para el establecimiento de cercas vivas en la finca o como estantes para otros usos.

Cuadro 22. Biomasa aérea y carbono total almacenado en arbustos de *G. sepium* en el TUT BF del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Especie y edad (años)	Densidad (árboles ha ⁻¹) (n)	Componente	Biomasa (Mg ha ⁻¹)	C total (Mg ha ⁻¹)
<i>G. sepium</i> (5)	4.440 ± 1194,05 (n=256)	Planta entera ^a	7,77 ± 1,87	3,88 ± 0,94
		Tallo principal	4,86 ± 1,06	2,43 ± 0,53
		Ramas ^b	2,12 ± 3,22	1,06 ± 1,61
		Forraje ^b	0,78 ± 1,18	0,39 ± 0,59
<i>G. sepium</i> (8)	889 ± 140,90 (n=114)	Planta entera	4,37 ± 0,44	2,18 ± 0,22
		Tallo principal	3,28 ± 0,30	1,64 ± 0,15
		Ramas	0,74 ± 0,75	0,37 ± 0,37
		Forraje	0,23 ± 0,21	0,11 ± 0,11
Total del sistema	5329^c	Planta entera	12,14	6,06
		Tallo principal	8,14	4,07
		Ramas	2,86	1,43
		Forraje	1,01	0,50

Donde: ^a Corresponde a la biomasa total arriba del suelo. ^b En todos los casos los valores referidos a ramas y forraje corresponden a un corte de la planta. ^c Valor estimado mediante la suma de los valores obtenidos para las plantas de ambas edades.

La biomasa total extraída del TUT BF con fines de utilización en la suplementación del rebaño bovino fue de 1,01 Mg ha⁻¹ corte⁻¹, lo cual representa 0,50 Mg C ha⁻¹ corte⁻¹ que se exporta del BF para su conversión en leche y carne. Este valor de carbono se incrementaría si se analizara en términos anuales, debido a que la frecuencia de poda es de 3 meses, y consecuentemente se podrían realizar hasta 4 cortes por año; lo que equivaldría a una extracción de biomasa de 2 Mg C ha⁻¹ año⁻¹.

4.1.6 Biomasa aérea y carbono total de árboles dispersos en potrero

El TUT PAD presentó una densidad de 120±46 árboles ha⁻¹ y cobertura de aproximadamente 35%; lo que representa una alta cobertura arbórea. Se identificaron 22 especies de árboles y 12 familias botánicas. Entre las familias con mayor número de individuos se destacaron Fabaceae y Malvaceae-Sterculioidae y las especies de mayor abundancia fueron *Pterocarpus officinalis*, *Guazuma ulmifolia*, *Samanea saman*, *G. sepium*, *Albizia psitacifolia* y

Enterolobium cyclocarpum (Anexo 5). De acuerdo con el criterio de área basal (Segura 2005), estas seis especies presentaron una dominancia relativa del 94,4%.

La distribución de individuos por clases diamétricas muestra baja presencia de brinzales y latizales bajos y predominio de latizales altos y fustales; consecuentemente a estas clases diamétricas corresponde la mayor densidad de población (Cuadro 23). Los valores estimados para la biomasa aérea y el carbono total en el componente arbóreo del TUT PAD fueron $36,27 \pm 12,41$ y $18,14 \pm 6,20$ Mg ha⁻¹, respectivamente.

Cuadro 23. Distribución de clases diamétricas, diámetro, altura total y densidad de árboles en el TUT PAD, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Clase diamétrica (cm)	n	DAP (cm)	Rango DAP (cm)	Altura (m)	Densidad (árboles ha ⁻¹)
≤ 4,99	24	3,7 ± 0,9	1,6 - 4,8	4,3 ± 1,4	7
5,0 - 9,99	105	7,4 ± 1,5	5,1 - 9,9	8,0 ± 2,7	31
10,0 - 29,99	170	16,6 ± 5,9	10,0 - 28,8	9,7 ± 2,9	51
≥30	103	42,9 ± 10,7	30,1 - 76,5	12,4 ± 3,5	31

4.2 Biomasa y carbono en gramíneas

4.2.1 Biomasa y carbono total en gramíneas de la pastura en callejones

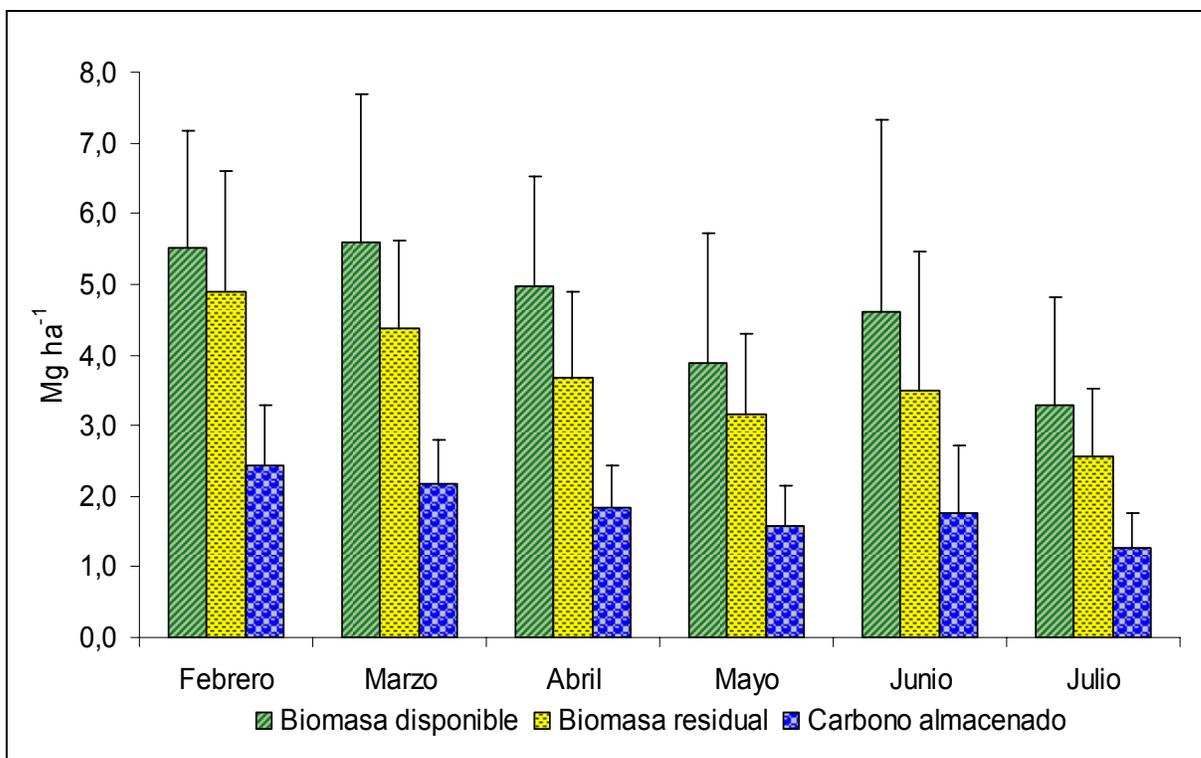
En la pastura del TUT PCL, ubicada en el potrero 1 del MF-ATS, se estimó una cobertura del suelo de $80,46 \pm 8,18\%$, y se caracterizó por el predominio de las gramíneas *C. nlemfuensis* y *E. polystachia*, aproximadamente un 15% de malezas y baja presencia de leguminosas herbáceas (Cuadro 24).

Durante el período febrero - julio de 2005 en el TUT PCL la pastura mostró una tendencia a la disminución de la producción, lo cual, se reflejó en una reducción de la cantidad de biomasa residual dejada por los animales luego del pastoreo, lo cual determinó la cantidad de carbono total estimado en la pastura (Figura 11).

Cuadro 24. Composición botánica de la pastura del TUT PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Especie	Cobertura del suelo (%)
<i>Cynodon nlemfuensis</i>	53,5
<i>Eriochloa polystachia</i>	14,1
<i>Panicum maximum</i>	9,4
<i>Brachiaria mutica</i>	6,8
<i>Brachiaria brizhanta</i>	1,3
Leguminosas herbáceas (varias especies)	0,3
Malezas (varias especies)	14,6

La disponibilidad promedio mensual de la pastura durante el período de evaluación fue de $4,86 \pm 0,87$ Mg MS ha⁻¹ y la biomasa residual promedio fue de $3,76 \pm 0,73$ Mg MS ha⁻¹ (Anexo 6). Consecuentemente, el valor promedio de carbono en la biomasa aérea de la pastura se estimó en $1,88 \pm 0,36$ Mg ha⁻¹ mes⁻¹.



Donde: Las barras indican la desviación estándar.

Figura 11. Biomasa disponible, biomasa residual luego del pastoreo y carbono almacenado en la biomasa residual de la pastura del TUT PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período febrero – julio de 2005.

Los resultados obtenidos de biomasa disponible para el período de evaluación contrastan con los obtenidos para la misma variable durante el período 1998-2004 (Anexo 7). Lo cual, podría estar asociado al patrón atípico de distribución de las lluvias ocurridas durante el año 2005 en la zona donde se desarrolló el estudio (Anexo 8). Durante los meses de enero y febrero de 2005, se observaron valores mensuales de precipitación acumulada de 210 y 423 mm, respectivamente. Estos registros superaron los valores promedio de 19 años para estos mismos meses de 50 y 55 mm, respectivamente.

Con base en lo anterior, los altos valores de biomasa disponible observados en la pastura no son característicos durante esa época del año en la zona. La cual, por las condiciones de los suelos y el régimen de precipitación, presenta un marcado déficit hídrico entre los meses de enero y abril.

4.2.2 Biomasa y carbono total en caña de azúcar

Para facilitar el análisis de los resultados, en esta sección se presentan también los resultados obtenidos para la hojarasca del TUT CAZ, ya que se observó que esta es generada en su mayor proporción por el mismo cultivo. El rendimiento en base fresca obtenido en el cultivo de caña de azúcar para las fracciones tallo, cogollo y hojarasca fina fue de $72,34 \pm 10,17$; $18,00 \pm 4,35$ y $33,04 \pm 8,28$ Mg ha⁻¹, respectivamente, para un total de $123,38 \pm 12,30$ Mg ha⁻¹ de la planta entera.

La materia seca y el carbono total estimados por fracción de la planta y total se presentan en el Cuadro 25. Las fracciones tallo y cogollo representaron el 58,19% ($28,79$ Mg ha⁻¹) de la materia seca total. Estas fracciones son extraídas del sistema para su utilización en la alimentación de cerdos y bovinos; mientras que la hojarasca representó el 41,81% de la materia seca producida por el cultivo arriba del suelo. Esta, se deja sobre el suelo y se aprovecha como cobertura muerta entre las hileras cultivadas. En la hojarasca fina del TUT CAZ se acumuló $10,35 \pm 4,42$ Mg ha⁻¹ de carbono total (Cuadro 25).

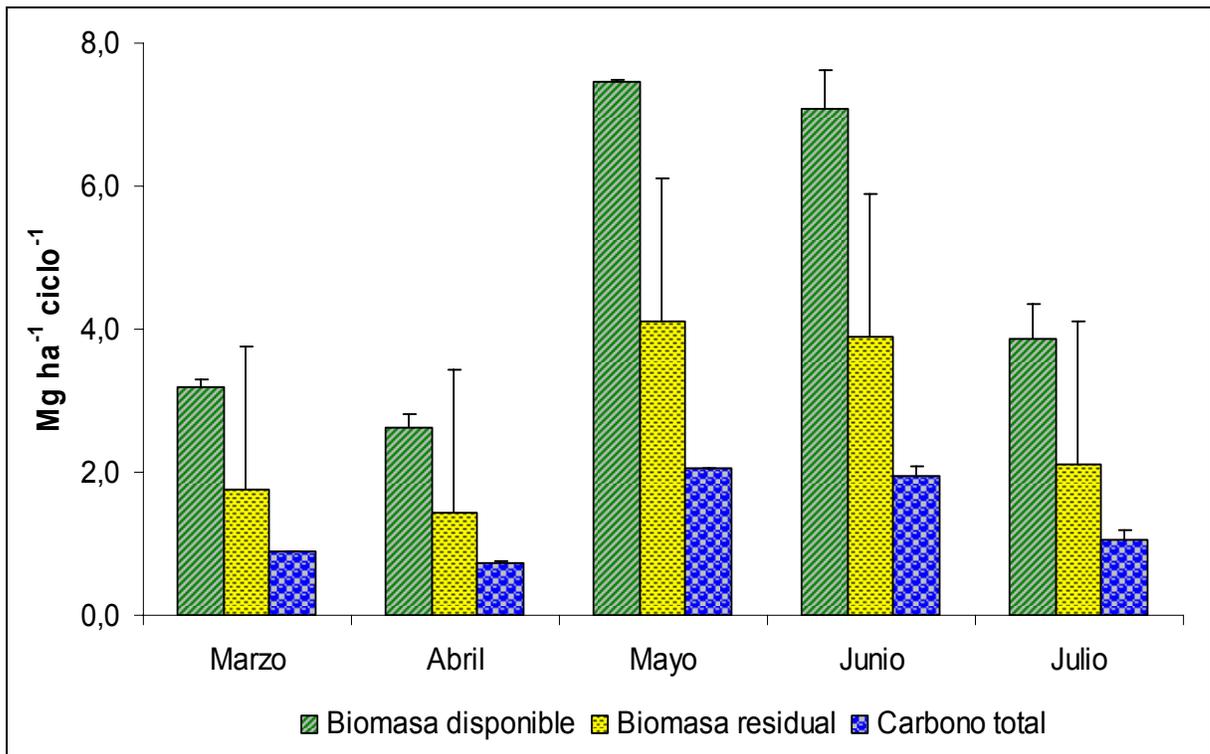
Cuadro 25. Biomasa, hojarasca y carbono total presentes en planta entera y fracciones de caña de azúcar, variedad Canal Point 721210, TUT CAZ, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Componente	Materia seca		Carbono total (Mg ha ⁻¹)
	Mg ha ⁻¹	%	
Tallo	$23,09 \pm 3,75$	46,67	$11,55 \pm 1,87$
Cogollo	$5,70 \pm 1,35$	11,52	$2,85 \pm 0,68$
Hojarasca ^a	$20,69 \pm 8,85$	41,81	$10,35 \pm 4,42$
Total	$49,48 \pm 11,80$	100,00	$24,74 \pm 5,90$

Donde: ^a Corresponde a la hojarasca fina (residuos con diámetro ≤ 2 cm).

4.2.3 Biomasa y carbono total en gramíneas de la pastura con árboles dispersos

En el TUT PAD se presentó el predominio de la gramínea *P. maximum* con $83,82 \pm 4,97\%$ y malezas de diferentes especies con $16,18 \pm 4,97\%$; mientras que la cobertura del suelo por la gramínea fue de $70,50 \pm 15,69\%$. El patrón de distribución de la biomasa disponible, biomasa aérea residual y carbono total del TUT PAD durante el período marzo – julio se presenta en la Figura 12.



Donde: Las barras indican la desviación estándar.

Figura 12. Biomasa disponible, biomasa residual y carbono total almacenado en la pastura en el TUT PAD del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período marzo – julio de 2005.

Los valores promedio estimados de biomasa disponible, biomasa residual y carbono total en la pastura, fueron de $4,68 \pm 1,99$; $2,57 \pm 1,09$ y $1,29 \pm 0,55$ $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$, respectivamente. Considerando el aprovechamiento de la pastura se estimó una extracción promedio de biomasa por ciclo de pastoreo de $2,19 \pm 0,90$ Mg ha^{-1} , equivalente a $1,05 \pm 0,45$ Mg C ha^{-1} .

Aunque las condiciones climáticas fueron las mismas, la pastura del TUT PAD no presentó un comportamiento de la producción de biomasa disponible similar al TUT PCL; esto, posiblemente se debió a que a finales del mes de enero se realizó en el PAD un pase de rolo argentino a fin de efectuar el control de malezas y evitar la acumulación de material maduro o senescente de *P. maximum* en la pastura. En consecuencia, no se observó una alta acumulación de biomasa madura en la gramínea, lo cual se reflejó en los valores de disponibilidad de biomasa de la pastura (Figura 12).

4.3 Carbono en la necromasa

4.3.1 Carbono total en la hojarasca y detritos no finos del bosque primario

En la evaluación inicial, el peso seco y el carbono total estimados en la hojarasca del bosque primario presentaron valores de $13,96 \pm 8,85$ y $6,98 \pm 4,43$ Mg ha⁻¹, respectivamente. Estos fueron mayores al resto de los valores obtenidos en las evaluaciones posteriores, por corresponder a la hojarasca presente en las parcelas en el muestreo inicial. En las evaluaciones subsiguientes, como era de esperarse, los valores de biomasa estimados mostraron una disminución de hasta $3,54 \pm 0,27$ Mg ha⁻¹ (Cuadro 26). En los detritos no finos se observó un almacenamiento de carbono de aproximadamente 2,0 Mg ha⁻¹.

Cuadro 26. Cantidad de hojarasca, detritos no finos y carbono total almacenado en un fragmento de bosque primario, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Componente / evaluación	n	Materia seca (Mg ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Acumulación de hojarasca (Mg MS ha ⁻¹ semana ⁻¹)
Hojarasca^a				
Jun/2005		$13,9 \pm 8,85$	$6,98 \pm 4,43$	
Jul/2005	120	$9,5 \pm 5,44$	$4,75 \pm 2,72$	$1,74 \pm 1,49$
Ago/2005		$3,5 \pm 1,53$	$1,77 \pm 0,77$	
Sept/2005		$4,2 \pm 1,81$	$2,09 \pm 0,90$	(n=12)
Detritos no finos^b				
Jun/2005	4	$3,96 \pm 1,89$	$1,98 \pm 0,95$	ND

Donde: ^a Corresponde a la hojarasca fina (residuos con diámetro ≤ 2 cm), ^b Corresponde a residuos de madera gruesa (residuos con diámetro > 2 cm), ND =No determinado.

El contenido de carbono en la hojarasca del bosque ($6,98 \text{ Mg ha}^{-1}$) fue mayor que el reportado por Delaney et ál. (2007) de $2,7 \pm 0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$. Sin embargo, la cantidad de carbono en la madera muerta (detritos no finos) observada en este estudio ($1,98 \pm 0,95 \text{ Mg ha}^{-1}$) está dentro del ámbito encontrado por estos mismos autores ($1,2$ a $4,3 \text{ Mg ha}^{-1}$).

La tasa de acumulación semanal de hojarasca fue de $1,74 \pm 1,49 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Cuadro 26); que expresado en términos de carbono equivale a una acumulación aproximada de $0,87 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ semana}^{-1}$. Estos resultados denotan la alta producción de materia seca por la biota del bosque; de la cual, una fracción pasa a formar parte de la materia orgánica del suelo.

4.3.2 Carbono total en la hojarasca de la pastura en callejones de *Leucaena leucocephala*

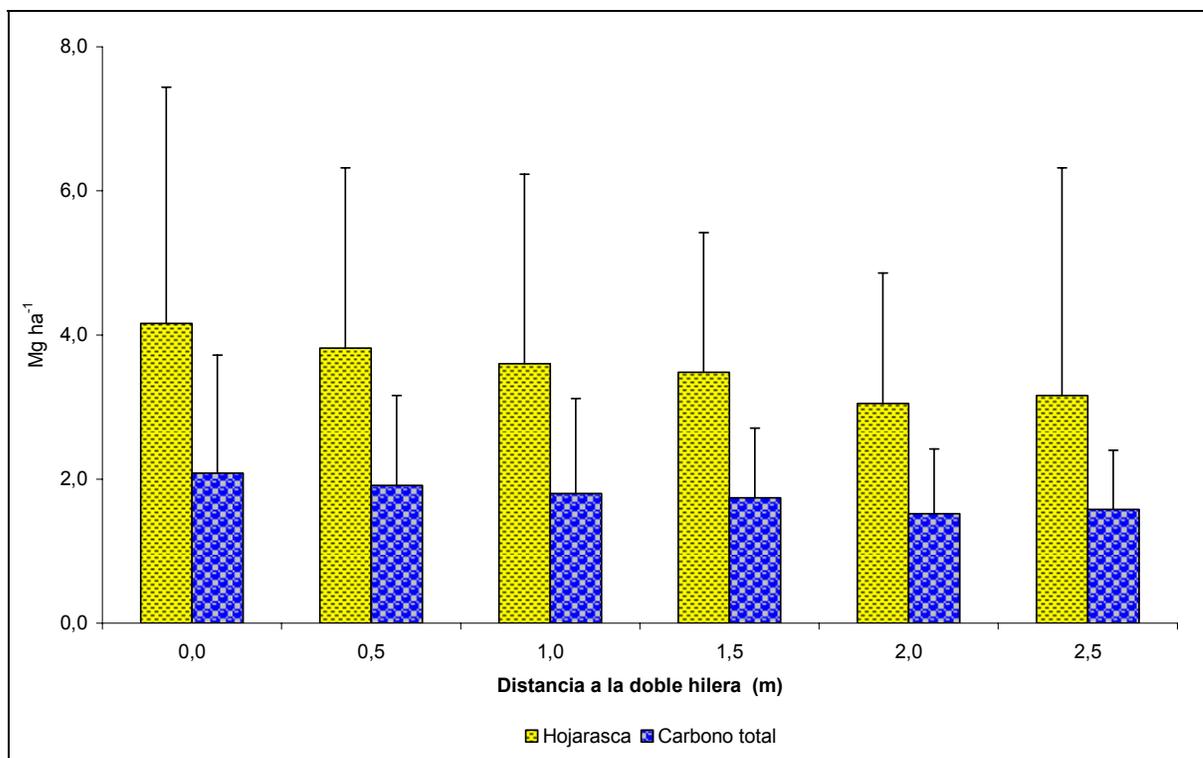
La hojarasca y el carbono total del TUT PCL presentes al primer muestreo fueron de $6,46 \pm 3,21$ y $3,23 \pm 1,61 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente. Con base en las evaluaciones consecutivas se obtuvo una acumulación semanal de la hojarasca de $1,19 \pm 0,18 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ semana}^{-1}$ (Cuadro 27).

Cuadro 27. Hojarasca, carbono total y tasa de acumulación de la hojarasca del TUT PCL, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Evaluación	n	Hojarasca ^a (Mg MS ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Acumulación de hojarasca (Mg MS ha ⁻¹ semana ⁻¹)
Mayo/2005		$6,46 \pm 3,21$	$3,23 \pm 1,61$	
Jun/2005		$3,40 \pm 1,31$	$1,70 \pm 0,65$	$1,19 \pm 0,18$
Jul/2005	120	$3,45 \pm 1,69$	$1,72 \pm 0,84$	
Ago/2005		$2,02 \pm 0,90$	$1,01 \pm 0,45$	(n=16)
Sept/2005		$2,40 \pm 0,87$	$1,20 \pm 0,43$	

Donde: ^a Corresponde a la hojarasca fina (residuos con diámetro $\leq 2 \text{ cm}$).

El patrón de distribución de la biomasa y el carbono total en la hojarasca de la pastura del TUT PCL se presenta en la Figura 13. Los valores obtenidos no mostraron efecto de la posición de muestreo ($p < 0,01$) con respecto a la acumulación de hojarasca.



Donde: Las barras indican la desviación estándar.

Figura 13. Distribución de la biomasa y carbono total de la hojarasca de acuerdo a la posición de muestreo con respecto a la doble hilera de *L. leucocephala* en el TUT-PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

4.3.3 Carbono total en la hojarasca del banco forrajero de *Gliricidia sepium*

La hojarasca y el carbono total presentes al primer muestreo en el TUT BF fueron de $7,71 \pm 4,69$ y $3,86 \pm 2,34$ Mg ha⁻¹, respectivamente. Los muestreos posteriores determinaron una tasa de acumulación de la hojarasca de $0,86 \pm 0,42$ Mg ha⁻¹ semana⁻¹ (Cuadro 28).

Cuadro 28. Hojarasca, carbono total presentes y tasa de acumulación de la hojarasca del TUT BF, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Evaluación	n	Hojarasca ^a (Mg MS ha ⁻¹)	Carbono (Mg ha ⁻¹)	Acumulación de hojarasca (Mg MS ha ⁻¹ semana ⁻¹)
Mayo/2005	120	7,71 ± 4,69	3,86 ± 2,34	0,86 ± 0,42 (n=12)
Jun/2005		6,27 ± 3,72	3,14 ± 1,86	
Ago/2005		4,37 ± 2,76	2,18 ± 1,38	
Sept/2005		3,27 ± 1,06	1,63 ± 0,53	

Donde: ^a Corresponde a la hojarasca fina (residuos con diámetro ≤ 2 cm).

4.3.4 Carbono total en la hojarasca de la pastura con árboles dispersos

La hojarasca y el carbono total al primer muestreo del TUT PAD fueron de 7,45±4,74 y 3,73±2,37 Mg ha⁻¹, respectivamente, con una tasa de acumulación de la hojarasca de 0,96±0,48 Mg ha⁻¹ semana⁻¹ (Cuadro 29).

Cuadro 29. Biomasa y carbono total presentes y tasa de acumulación de la biomasa de la hojarasca del TUT PAD, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Evaluación	n	Hojarasca ^a (Mg MS ha ⁻¹)	Carbono total (Mg ha ⁻¹)	Acumulación de hojarasca (Mg MS ha ⁻¹ semana ⁻¹)
Jun/2005	120	7,45 ± 4,74	3,73 ± 2,37	0,96 ± 0,48 (n=12)
Jul/2005		7,22 ± 4,53	3,61 ± 2,27	
Ago/2005		3,09 ± 1,56	1,54 ± 0,78	
Sept/2005		3,92 ± 1,84	1,96 ± 0,92	

Donde: ^a Corresponde a la hojarasca fina (residuos con diámetro ≤ 2 cm).

La hojarasca presente, según la posición de muestreo mostró diferencias significativas (p<0,05). La mayor acumulación de biomasa se observó en la base del árbol (6,54±4,52 Mg MS ha⁻¹) y en la pastura a pleno sol (5,67±4,30 Mg MS ha⁻¹), mientras que fue menor en la gotera del árbol (4,05±2,41 Mg MS ha⁻¹).

4.4 Características físicas y químicas de los suelos

Los resultados obtenidos para las variables físicas y químicas de los suelos correspondientes al TUT BP (Anexo 9) muestran que a excepción de la capa de 0-5 cm, existe amplia variabilidad textural en el perfil del suelo. Las texturas van desde livianas, en la capa superficial; a intermedias y pesadas en las capas más profundas. De acuerdo con los valores obtenidos de humedad, y según lo observado en el campo, en las profundidades 5-20 y 20-40 cm se evidencia la presencia de una capa compactada. Consecuentemente, a partir de los 20 cm de profundidad se incrementó la D_a y se redujeron los macroporos y la conductividad hidráulica saturada (K_s).

Los suelos del TUT BP son fuertemente ácidos a moderadamente ácidos (pH en un ámbito entre 4,3 y 5,4). Sin problemas de salinidad; con bajo contenido de P; el K es alto en la capa de 0-5 cm de la parcela 4 y en el resto de los perfiles es bajo. En cuanto al Mg, se obtuvieron valores medios a altos en las parcelas 1 y 2; mientras que fueron altos en las parcelas 3 y 4. El Ca tendió a ser alto en la capa superficial, medio en las capas intermedias y bajo en las capas más profundas. El COS y la CIC fueron bajos.

En los suelos correspondientes al TUT PCL (Anexo 10) las texturas son variables con predominio de las clases texturales livianas a intermedias. Los valores de D_a son altos y tienden a incrementarse en profundidad; lo cual, se asocia a la presencia de la capa compactada o con características de fragipán. Los valores de K_s tienden a ser bajos y disminuyen abruptamente con la profundidad. La proporción de macroporos es baja (<10%) y la humedad varía en el perfil, siendo menor en las profundidades en las que se ubicó la capa compactada. Por las condiciones físicas de los suelos del TUT PCL se considera que presentan problemas de drenaje interno y aireación.

Desde el punto de vista químico los suelos del TUT PCL, tienden ligeramente a ser menos ácidos que los del TUT BP. Predominan los suelos con pH fuertemente ácido a moderadamente ácido. No presentan problemas de salinidad. El contenido de P es bajo, al igual que el K, mientras que el Mg mostró valores medios a altos. En cuanto al Ca, en las

parcelas 1 y 2 predominan valores altos, mientras que en las parcelas 3 y 4 se presentaron valores medios a bajos.

Los suelos del TUT BF (Anexo 11) presentan texturas similares hasta 20 cm de profundidad, con excepción de la parcela 4. En general, en todos los perfiles predominan las clases texturales intermedias. La D_a tiende a incrementarse con la profundidad; de igual manera, los macroporos disminuyen por debajo del 10%, y en la mayoría de los casos la K_s se reduce a menos de 2 cm h^{-1} ; lo que, al igual que en otros suelos del área, denota la presencia de una capa compacta en el área del TUT BF.

Con respecto al pH, predominan suelos de moderada y ligera acidez hasta neutros (parcela 4). El P presenta alta variabilidad en las capas superficiales; encontrándose valores bajos, medios y altos. Sin embargo, a partir de los 20 cm de profundidad, es bajo. Similar comportamiento presenta el K, ya que en la capa superficial los valores son medios a altos, mientras que en el resto del perfil son bajos. El Ca y Mg son altos, el COS y la CIC son bajos y no se observan problemas de salinidad.

En los suelos correspondientes al TUT CAZ (Anexo 12) las texturas presentan una mayor uniformidad que en los suelos antes descritos. Predominan las clases texturales intermedias. Los valores de D_a se incrementan con la profundidad y se reduce la proporción de macroporos y la K_s ; lo cual, al igual que en los casos anteriores, demuestra la presencia de capas compactadas en el perfil del suelo.

En el TUT CAZ, los resultados de los análisis químicos mostraron valores bajos a medios de P, el K presenta valores bajos en las capas profundas, mientras que en la capa superficial (0-5 cm) se obtuvieron valores medios. Los valores de Ca y Mg son altos en todo el perfil. La CIC es baja y no se observaron problemas de salinidad. En general, son suelos de mayor fertilidad que los de BP y PCL, pero con importantes limitaciones físicas para el desarrollo de cultivos.

En el TUT PAD (Anexo 13) los suelos de las parcelas 1,2 y 4 presentan clases texturales similares entre sí (FAa, FA), mientras que en la parcela 3 predominan texturas más pesadas (FAL y AL). Al igual que los suelos de otros TUT, la Da se incrementa con la profundidad y se reduce la proporción de macroporos y la Ks. Lo anterior, evidencia la presencia de la capa compacta, aunque para las condiciones de estos suelos se ubica en algunos casos a una mayor profundidad.

El pH de los suelos del TUT PAD es variable, y comprende desde moderadamente y ligeramente ácidos hasta neutros (parcela 3). En cuanto al contenido de nutrientes se presentan bajos contenidos de P, el K presenta valores medios en la capa superficial y bajos en el resto del perfil. El Ca y Mg presentan valores altos, con excepción de la parcela 4, donde a partir de los 20 cm se observaron valores medios. El COS es bajo y no se presentan problemas de salinidad.

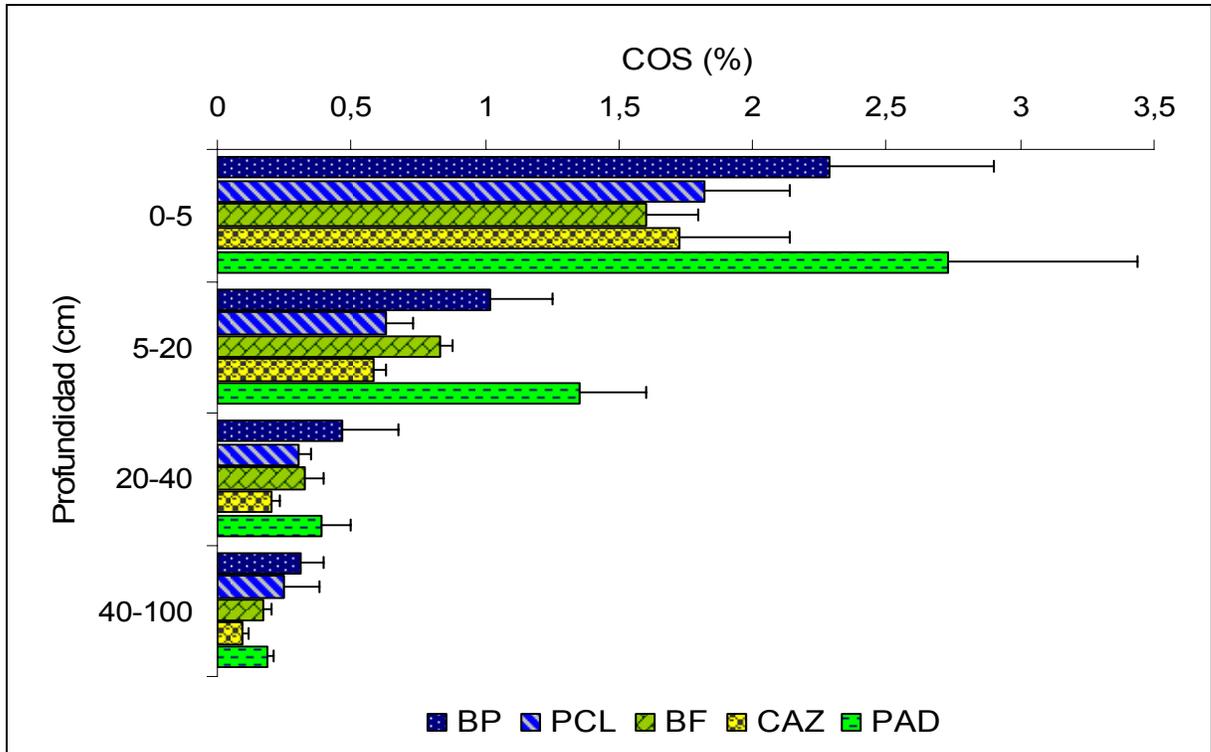
4.5 Carbono orgánico en el suelo

En la Figura 14 se presenta la proporción de COS (%) estimado en el suelo para cada TUT a las diferentes profundidades estudiadas. La mayor proporción de COS se observó en los dos primeros estratos muestreados (0-5 y 5-20 cm) del perfil del suelo de cada TUT.

A nivel superficial, la mayor proporción de COS correspondió al TUT PAD, seguido de BP; similar comportamiento se observó en la profundidad 5-20 cm; mientras que a la profundidad 20-40 cm, la mayor acumulación de COS se observó en el TUT BP, seguido de PAD. En la profundidad 40-100 cm, la mayor concentración de COS correspondió al TUT BP, seguido de PCL. En general, la proporción de COS en los suelos estudiados fue baja, disminuyó en función de la profundidad y presentó variaciones entre TUT.

En un estudio realizado por Delaney et ál. (1997) en bosques ubicados en cinco diferentes zonas de vida en Venezuela, se obtuvo que en cuatro de ellas el COS disminuyó con la profundidad (excepto en zona de Bosque Húmedo Tropical), y en los primeros 50 cm de

profundidad del suelo se concentró del 67 al 70% del COS. Los resultados obtenidos en este estudio en los suelos del BP, concuerdan con los de estos autores.



Donde: Las barras indican la desviación estándar. BP= bosque primario, PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar, PAD= pastura con árboles dispersos.

Figura 14. Proporción promedio de carbono orgánico del suelo hasta un metro de profundidad bajo diferentes TUT, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Delaney et ál. (1997) señalan que la cantidad de COS es el resultado del balance entre las entradas por la caída de hojarasca y otros detritos y las salidas por descomposición y lixiviación en el suelo. El COS es un pool activo y juega un rol importante en el ciclo global del carbono; y dependiendo del uso y manejo del suelo, estos pueden ser fuentes o sumideros de CO_2 (Lal 2001). En este sentido, las principales actividades antropogenas conllevan a la reducción del COS y emisión de GEI a la atmósfera (Lal 2001).

Los resultados obtenidos y el manejo actual sugieren que en los TUT bajo intervención, en

los últimos años se ha producido un efecto importante de la acumulación de hojarasca sobre el COS en las capas superficiales. En este sentido, Buurman et ál. (2004) sostienen que el contenido de carbono en el suelo depende de las entradas de hojarasca y de la velocidad de descomposición de la misma.

De igual manera, se estima que las pasturas incorporan materia orgánica y mantienen una intensa dinámica de intercambio de carbono a través de las raíces finas, lo cual contribuye a mantener los niveles de COS superficial. Se ha documentado que a diferencia de las gramíneas nativas, las gramíneas africanas introducidas en las sabanas de Sudamérica han contribuido a incrementar la materia orgánica, y en consecuencia favorecen la acumulación de carbono en el suelo (Fisher y Trujillo 1999).

Tomando como referencia las condiciones edáficas del TUT BP, estudios previos de suelos del área (Zambrano 1986; UCV 1999, Torres y Madero 1999, Fraute 2001, Arias et ál. 2001) y la historia de uso de los suelos del MF-ATS; se estima que al menos hasta 1996, algunos de estos suelos sufrieron procesos de degradación asociados al manejo. En la actualidad, existen evidencias, al menos en lo que respecta al COS, que se han logrado mejoras importantes en cuanto a la incorporación de materia orgánica. Lo anterior, está en concordancia con las recomendaciones generadas en el estudio de línea base de suelos (UCV 1999) de mantener la cobertura permanente del suelo, incorporar materia orgánica, evitar la excesiva mecanización y el sobrepastoreo; de manera de protegerlo de la degradación.

En el Cuadro 30 se presenta el inventario de COS estimado en los diferentes TUT estudiados, los valores fueron corregidos de acuerdo a la densidad aparente del suelo y se expresan en Mg ha^{-1} hasta una profundidad de un metro equivalente (1 m-eq.). De igual manera, se presenta la proporción relativa y acumulada de COS para cada TUT. La variabilidad de los resultados observados de COS por profundidad, fue mayor en los TUT PAD y BP hasta los 40 cm, mientras que de 40-100 cm, fue mayor en los TUT PCL y BP (Cuadro 30).

La corrección de los valores de COS de acuerdo con una masa del suelo fija, tal como lo sugieren Ellert et ál. (2002) y Buurman et ál. (2004) permitió controlar la sobreestimación de esta variable. Al respecto, Moreno y Lara (2003) señalan que este procedimiento evita enmascarar las pérdidas de COS producidas en suelos intervenidos. De igual forma, estos autores afirman que la densidad aparente aumenta en función de la profundidad y al ocurrir procesos erosivos, ésta se incrementa a nivel superficial, debido a que quedan expuestas las capas subsuperficiales del suelo.

Cuadro 30. Inventario y proporción acumulada de carbono orgánico del suelo hasta un metro de profundidad equivalente (1 m - eq) en diferentes TUT, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

TUT	Unidad	Profundidad (cm)				Total
		0-5	5-20	20-40	40-100	
BP	Mg ha ⁻¹	14,60±3,79	20,30±4,81	14,23±6,84	30,11±8,00	79,24±20,81
	%	18	44	62	100	
PCL	Mg ha ⁻¹	11,92±2,66	13,65±2,30	8,82±1,61	23,83±12,09	58,22±13,20
	%	20	44	59	100	
BF	Mg ha ⁻¹	9,94±1,07	18,58±0,37	10,18±2,55	15,57±2,81	54,27±1,80
	%	18	53	71	100	
CAZ	Mg ha ⁻¹	11,30±1,79	13,16±2,40	6,05±0,77	8,55±2,62	39,04± 3,84
	%	29	63	78	100	
PAD	Mg ha ⁻¹	18,90±5,46	29,25±4,60	11,66±2,81	17,73±2,60	77,53±11,23
	%	24	62	77	100	

Donde: BP= bosque primario, PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar y PAD= pastura con árboles dispersos. Valores presentados como promedio ± desviación estándar.

El mayor contenido de COS acumulado en el suelo hasta un metro de profundidad correspondió a los TUT BP y PAD, con valores similares (79,24 y 77,53 Mg ha⁻¹, respectivamente); luego se ubicaron los TUT PCL y BF con valores promedio similares entre sí; mientras que el menor contenido correspondió al TUT CAZ. Además, se observó una alta variabilidad de los datos, principalmente en los TUT BP, PCL y PAD (Cuadro 30).

Los valores de COS (hasta 1 m-eq) obtenidos para el BP se ubicaron en el rango reportado por Delaney et ál. (1997) para una zona de transición de Bosque Húmedo a Bosque Seco Tropical (73-153 Mg ha⁻¹) en Venezuela. Sin embargo, estos fueron inferiores a los obtenidos por Moreno y Lara (2003) para bosques primarios intervenidos en Porce, Colombia (179,1 Mg ha⁻¹); a los reportados por Ibrahim et ál. (2007) en bosques secundarios en una zona de Bosque Seco Tropical de Costa Rica (116 Mg ha⁻¹ m⁻¹) y de Bosque Húmedo Tropical de Nicaragua (139 Mg ha⁻¹ m⁻¹); y también, menores a los obtenidos por Amézquita et ál. (2008) en bosques primarios en las montañas andinas (186-231 Mg ha⁻¹ m⁻¹) y zona de Bosque Húmedo Tropical en la Amazonía de Colombia (107 Mg ha⁻¹ m⁻¹).

El valor de COS obtenido para el TUT PAD fue mayor que el reportado por Ramos (2003) para una pastura mejorada con árboles (59,87 Mg COS ha⁻¹ y densidad de 108 árboles ha⁻¹) en una zona de Bosque Seco Tropical en Costa Rica. Sin embargo, en ese estudio se estimó el COS hasta 0,8 m; mientras que, en el presente la densidad arbórea fue mayor (120 árboles ha⁻¹) y la estimación del COS se realizó hasta un metro de profundidad. También, fue menor que el valor obtenido por Ruiz (2002) en pasturas mejoradas (*Brachiaria brizantha*, *P. máximum*, *Cynodon dactylon*) con árboles dispersos en Nicaragua (155 Mg ha⁻¹, hasta 80 cm de profundidad).

Trabajos conducidos por Rojas (2005) y Andrade et ál. (2008) en una zona de Bosque Seco Tropical en Costa Rica en sistemas de pasturas de *B. brizantha* en asocio con *S. saman*, *Dalbergia retusa* y *Dyphisa robinooides*, presentaron mayores valores de COS (>110 Mg ha⁻¹, hasta 60 cm de profundidad) que los obtenidos para el TUT PAD en este estudio.

Al analizar por estrato, se tiene que en los primeros 20 cm del suelo, en los TUT CAZ y PAD se concentró entre el 62 y 63% del COS estimado hasta un metro de profundidad; mientras que a la misma profundidad, en los TUT BP y PCL se encontró alrededor del 44% y en el TUT BF el 53% (Cuadro 30). Este patrón de distribución del COS en el perfil mantiene la misma tendencia hasta los 40 cm de profundidad; los TUT PAD y CAZ concentran entre el 77 y 78%, respectivamente. Mientras que en los TUT BP y PCL se obtuvo el 62 y 59% del COS, respectivamente.

En el estrato de 40-100 cm, los TUT CAZ y PAD evidenciaron la menor proporción de COS hasta la profundidad estudiada. En contraste, los TUT BP y PCL presentaron el 38 y 41% del COS, respectivamente (Cuadro 30). Diferentes estudios realizados en suelos de sistemas silvopastoriles indican que el comportamiento del COS se relaciona con la distribución de biomasa de raíces finas (Ruiz 2002, Ramos 2005, Rojas 2005, Andrade et ál. 2008).

Los resultados muestran que el COS a una profundidad mayor a 20 cm, fue en promedio el 47% del total hasta un metro, y los valores por TUT fueron de 56, 56, 47, 38 y 37% para BP, PCL, BF, PAD y CAZ, respectivamente. Lo anterior, brinda una aproximación sobre la vulnerabilidad del COS en estos suelos. El valor relativo promedio obtenido fue similar al reportado por Rojas (2005) con 45% y difiere de los encontrados por Ramos (2003) y Andrade et ál. (2008), quienes obtuvieron 55 y 56% del COS, respectivamente, a una profundidad mayor a 20 cm.

Al comparar los valores obtenidos de COS hasta 15 cm de profundidad equivalente de los TUT intervenidos de la finca con los generados en el estudio de línea base de suelos (UCV 1999), se observaron incrementos de 23, 50, 35 y 17% en los TUT PCL, BF, CAZ y PAD, respectivamente. De igual manera, los valores de COS (hasta 10 cm de profundidad) encontrados en este estudio al ser comparados con los obtenidos por Arias et ál. (2001) muestran incrementos de 20 y 22,5% de COS en los TUT PCL y BF, respectivamente. Estos resultados, son promisorios para la conservación de los suelos de la finca y sugieren que probablemente factores asociados al uso y manejo actual están contribuyendo de manera positiva al incremento del COS en los sistemas evaluados.

De acuerdo con la distribución del COS presentada en la Figura 4 y los resultados presentados en el Cuadro 30, se considera que en las capas superficiales (0-5 y 5-20 cm), se produce una entrada importante de materia orgánica a este compartimiento y brinda una idea general de la dinámica del carbono en estos estratos. La cual, puede estar influenciada por las especies vegetales predominantes en estos sistemas, tipo de suelo, manejo aplicado y contenido de nutrientes (Fisher y Trujillo 1999). No obstante, se debe considerar que en las capas superficiales el COS es más propenso a oxidarse y a perderse por efecto de laboreo y procesos erosivos.

Los suelos de los TUT PAD y PCL a pesar de pertenecer al mismo orden (Alfisolos) y estar dedicados a uso silvopastoril (ambos con pasturas mejoradas), presentaron una diferencia a favor del primero de 19,31 Mg COS ha⁻¹. Esta diferencia, podría ser debida a que en el caso del TUT PAD se trata de una pastura de mayor edad (no determinada), con cobertura de *P. maximum*, con predominio de diferentes especies arbóreas a alta densidad (120 árboles ha⁻¹) y bajos niveles de mecanización. Mientras que el TUT PCL, con ocho años de edad, presentó una mezcla de gramíneas en la que predominan *C. nlemfuensis* y *E. polystachia* (Cuadro 24), arbustos de *L. leucaena* para ramoneo, y según su historia de uso (ver inciso 3.2.1), un mayor nivel de mecanización debido a que hasta el año 1995 estos suelos se dedicaron al cultivo de maíz y soya bajo prácticas de manejo convencional.

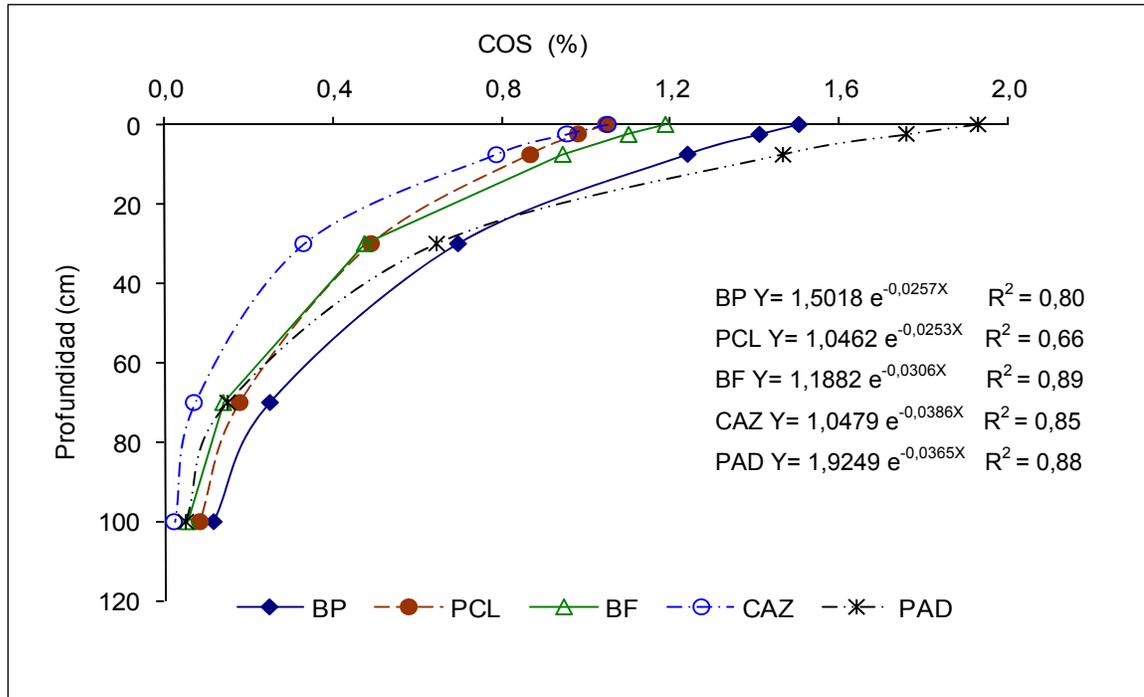
Los TUT CAZ y BF presentaron los menores contenidos de COS superficial. Sin embargo, experiencias de campo en la finca demostraron que las prácticas de cosecha en crudo de caña de azúcar (sin quema) y la incorporación de residuos de poda de *G. sepium* al suelo, han contribuido a la acumulación de una alta cantidad de materia orgánica en la superficie, y en consecuencia una fracción importante de esta pudo pasar a formar parte del COS. Aunque, la productividad de la biota sirve como entradas al carbono del suelo, otros factores como tipo de suelo, textura, mineralogía y clima regulan su cantidad (Delaney et ál. 1997).

4.6 Reducción del contenido de carbono orgánico del suelo

Como se indicó, el COS disminuyó en función de la profundidad. Resultados similares fueron obtenidos en otros estudios (Ruiz 2002, Moreno y Lara 2003, Ramos 2003, Rojas 2005, Andrade et ál. 2008). Para conocer las tendencias de la concentración relativa promedio del COS en los diferentes sistemas evaluados, se obtuvo la tasa de reducción del COS en función de la profundidad para cada TUT. El análisis de varianza (Anexo 14) para el modelo exponencial general mostró diferencias estadísticas altamente significativas entre TUT ($p < 0,001$) para los coeficientes a y b del modelo (intercepto y tasa de disminución del COS, respectivamente), con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,86.

La menor tasa de disminución de COS correspondió a los TUT BP y PCL, luego se agruparon los TUT PAD y BF; mientras que la mayor tasa de disminución se observó en el

TUT CAZ. Las ecuaciones obtenidas para el modelo exponencial de disminución del contenido de COS se presentan en la Figura 15; se observó que los valores estimados del coeficiente de determinación oscilaron entre 0,66 y 0,89.



Donde: BP= bosque primario, PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar, PAD= pastura con árboles dispersos, Y= carbono orgánico del suelo (COS) y x= profundidad.

Figura 15. Disminución del contenido de carbono orgánico del suelo según modelo exponencial en diferentes TUT, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Las ecuaciones obtenidas permiten estimar la cantidad relativa de COS a una determinada profundidad en los TUT estudiados. Debido a que estas fueron generadas con base en los datos de cuatro calicatas por cada TUT puede haber ciertos sesgos en la estimación del COS. De igual manera, no se considera recomendable su uso en sitios diferentes a los donde se generaron los datos.

4.7 Materia seca y carbono total almacenado en el sistema

4.7.1 Materia seca arriba del suelo

En el Cuadro 31 se resumen los valores estimados de materia seca por componente arriba del suelo en los diferentes TUT evaluados. El contenido de materia seca del TUT BP fue mayor que el promedio observado en el resto de los TUT. Mientras que en los TUT con intervención antropogénica, los mayores contenidos de materia seca arriba del suelo se observaron en CAZ y PAD, y los menores correspondieron a BF y PCL.

El valor obtenido de biomasa total en el componente leñoso del TUT BP fue mayor al promedio estimado por Orrego y Del Valle (2003) para bosques primarios intervenidos ($227,85 \text{ Mg ha}^{-1}$)¹⁵ en la Cuenca del río Porce, en Antioquia, Colombia. En ese estudio, de manera similar al presente, el aporte del componente leñoso al contenido de biomasa aérea fue de 92%.

En los TUT BP, PAD y BF el aporte del componente arbóreo a la materia seca total del sistema, representó el 94, 78 y 61%, respectivamente. Se destaca la contribución de la biomasa del componente arbóreo de los TUT PAD y BF al almacenamiento de carbono en los sistemas bajo intervención. En contraste, en el TUT PCL, los arbustos de *L. leucocephala* solo contribuyeron con 7% de la biomasa total del sistema.

El alto aporte del componente arbóreo a la biomasa aérea total del TUT BP (94%) está en concordancia con lo reportado en la literatura y guarda relación directa con el almacenamiento de carbono. En este sentido, Ramos (2003), señala que la biomasa aérea de los bosques constituye el reservorio principal de carbono. Además, del carbono que se almacena en la biomasa radicular. Esto obedece a la mayor densidad arbórea en las áreas boscosas (Chacón et ál. 2007).

Durante el período en estudio las pasturas de los TUT PCL y PAD presentaron similar disponibilidad promedio mensual de biomasa ($4,86$ y $4,68 \text{ Mg MS ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$,

¹⁵ Referido a la primera medición realizada en 1999-2000.

respectivamente). Considerando el mismo orden, el contenido promedio de la biomasa residual de las pasturas en cada sistema fue de 3,76 y 2,57 Mg MS ha⁻¹ ciclo⁻¹, respectivamente. La diferencia en los valores de biomasa residual entre sistemas pudo deberse, entre otros factores, a la carga animal utilizada en las pasturas y consecuentemente al consumo de materia seca de los animales. Los valores de biomasa residual obtenidos para PCL y PAD fueron superiores al reportado por Ramos (2003) para una pastura de *B. brizantha* con árboles dispersos (Mg ha⁻¹) en una zona de Bosque Seco Tropical en Esparza, Costa Rica.

En el TUT PCL, la pastura estuvo compuesta por *C. nlemfuensis* (53,5%), *E. polystachia* (14,1%) y *P. máximum* (9,4%) con una cobertura del suelo por las gramíneas de 80%; mientras que en PAD, predominó *P. máximum* (83,8%) con una cobertura de 70,50%. La disponibilidad de biomasa del TUT PAD (*P. máximum*) pudo ser afectada por la alta densidad arbórea (120 árboles ha⁻¹) y alta cobertura de copa (35%) observadas en el sistema. Lo cual, tiende a disminuir la producción de la gramínea, pero mejora su calidad.

Diferentes estudios efectuados en zona de Bosque Seco Tropical confirman lo expuesto. Obispo et ál. (2008), evaluaron en Yaracuy, Venezuela, el efecto del nivel de sombra sobre la disponibilidad y calidad de *P. máximum*, y encontraron que baja (< 10%), media (20-30%) y alta (> 30%) densidad de sombra redujeron en 2, 30 y 38% la producción, respectivamente. Además, se mejoró la calidad de la pastura al incrementarse la sombra. En tanto, Villanueva et ál. (2008) evaluaron en Esparza, Costa Rica, el efecto de la sombra de diferentes especies nativas de árboles sobre la disponibilidad de *B. brizantha*; observaron diferencias entre especies de árboles (debido al tipo de copa) y se redujo la producción entre 4 y 97% con respecto a la pastura a pleno sol.

En el TUT CAZ la biomasa del cultivo de caña de azúcar (tallo y cogollo de caña de azúcar), contribuyó con el 58% de la biomasa aérea total del sistema. En este caso, se debe tener presente que la biomasa se extrae del sistema periódicamente, cuando se cosecha para su uso en la alimentación de bovinos y cerdos en la finca. Consecuentemente, la especie y el manejo aplicado determinan la temporalidad de la biomasa aérea, lo que define una permanencia anual del carbono total sobre el suelo en el sistema. En todos los TUT

estudiados se observó que la hojarasca aportó entre 6,46 y 20,69 Mg MS ha⁻¹ al total de la materia seca arriba del suelo. Los mayores valores de materia seca de la hojarasca se obtuvieron en los TUT CAZ y BP.

Al comparar el contenido total de hojarasca del TUT BP con el obtenido en el estudio referido de Orrego y Del Valle (2003), se observó una tendencia similar al observado para la biomasa arbórea, fue 23% mayor que en el caso de bosques primarios en la zona de Porce en Antioquia, Colombia.

Cuadro 31. Inventario de materia seca arriba del suelo por tipo de uso de la tierra, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

TUT	Componente				Total
	Hojarasca ^a	Detritos no finos ^b	Gramíneas	Árboles	
Mg MS ha ⁻¹					
BP	13,96±8,85	4,18±1,81		290,00±259,36	308,14
PCL	6,46±3,21		3,76±0,73	0,72±0,23	10,94
BF	7,71±4,69			7,77±1,87 ^c 4,37±0,44 ^d	19,85
CAZ	20,69±8,85		23,09±3,75 ^e 5,70±1,35 ^f		49,48
PAD	7,47±4,74		2,57±1,09	36,27±12,41	46,29

Donde: Donde: ^a Corresponde a la hojarasca fina (residuos con diámetro ≤ 2 cm), ^b Corresponde a residuos de madera gruesa (residuos con diámetro > 2 cm), ^c Tallo principal de *G. sepium* de 5 años de edad, ^d Tallo principal de *G. sepium* de 8 años de edad, ^e Biomasa del tallo de caña de azúcar, ^f Biomasa del cogollo de caña de azúcar. BP= bosque primario, PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar y PAD= pastura con árboles dispersos.

El manejo aplicado al cultivo de caña de azúcar en la finca determina que la cosecha se realiza sin quema, por lo tanto la hojarasca generada es distribuida como cobertura al suelo bajo cultivo. En contraste, en la mayoría de las fincas productoras de caña de azúcar de Yaracuy (y en otras zonas productoras de caña de azúcar en Venezuela) se observa que previo a la cosecha se quema el cultivo para eliminar las hojas y la hojarasca. Sin embargo, se ha documentado que esta práctica ocasiona daños al suelo, emisiones de GEI a la

atmósfera y afecciones respiratorias importantes en la población de las comunidades cercanas a las fincas productoras. Con respecto al aporte relativo de la hojarasca a la materia seca total por TUT, se obtuvo que en CAZ y BF fue de 42 y 39%, respectivamente. En los TUT BP, PAD y PCL, representó el 6, 16 y 59% del total por sistema, respectivamente.

Los resultados obtenidos destacan la importancia de los diferentes TUT de la finca en la acumulación y variabilidad en el contenido de materia seca arriba del suelo, la cual; además del compartimiento del suelo, es determinante para el almacenamiento y remoción de carbono de la atmósfera a nivel de los agrosistemas.

4.7.2 Carbono total en el sistema

En el Cuadro 32 y Figura 16 se presenta la cantidad promedio de carbono total almacenado por TUT; el cual, corresponde al compartimiento del suelo (COS) y al almacenado en la biomasa aérea (de árboles y gramíneas) y necromasa.

Tal como era de esperarse, el carbono total estimado en la biomasa del componente arbóreo del TUT BP, fue mayor al observado en el resto de los TUT e incluso al COS hasta un metro de profundidad. Por el contrario, en los TUT con intervención antropógena, esta relación se invirtió y el COS fue mayor que el carbono total de la biomasa aérea.

Los resultados obtenidos para el carbono total almacenado en el componente arbóreo del TUT BP estuvieron en el rango reportado por Delaney et ál. (1997) en bosques nativos en condiciones climáticas similares en Venezuela ($80 - 256 \text{ Mg ha}^{-1}$). Mientras que fue mayor que los valores obtenidos en estudios conducidos por Orrego y Del Valle (2003) en Antioquia, Colombia ($101,96 \text{ Mg ha}^{-1}$); Amézquita et ál. (2008) en bosques nativos en laderas andinas (70 Mg ha^{-1}) y en la Amazonía de Colombia ($75,9$ y $128,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), y en Esparza, Costa Rica ($99,9 \text{ Mg ha}^{-1}$). Sin embargo, fue inferior al valor reportado por estos mismos autores, en Pocora, Costa Rica ($174,2 \text{ Mg ha}^{-1}$).

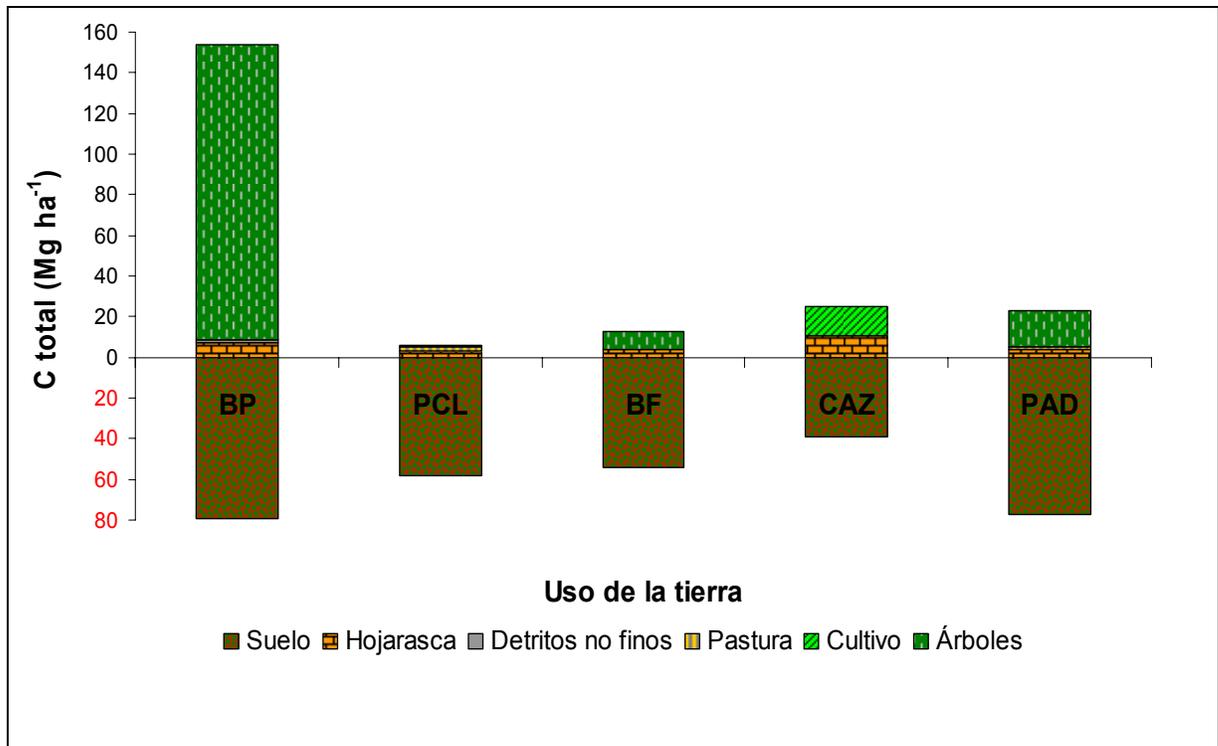
Cuadro 32. Inventario de carbono total por tipo de uso de la tierra, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

TUT	Componente					C total Mg ha ⁻¹	% ^c
	Suelo Mg COS ha ⁻¹	Hojarasca ^a	Detritos no finos ^b	Gramíneas	Árboles		
	Mg C ha ⁻¹						
BP	79,24	6,98	1,98		145,00	233,20	100
PCL	58,22	3,23		1,88	0,72	64,05	28
BF	54,27	3,86			4,07	67,00	29
CAZ	39,04	10,35		14,40		63,79	27
PAD	77,53	3,73		1,29	18,14	100,69	43

Donde: ^a Corresponde a la hojarasca fina (residuos con diámetro ≤ 2 cm), ^b Corresponde a residuos de madera gruesa (residuos con diámetro > 2 cm), ^c Proporción relativa de C de cada TUT con respecto al BP. BP= bosque primario, PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar y PAD= pastura con árboles dispersos.

El almacenamiento de carbono total en el TUT BP fue 3,2 veces mayor que el valor promedio obtenido en los TUT intervenidos (73,88 Mg ha⁻¹). En los restantes TUT, se destacó PAD por presentar alrededor de 100 Mg ha⁻¹ de carbono total almacenado, mientras que en los TUT PCL, BF y CAZ se obtuvieron valores en un ámbito entre 64 y 67 Mg ha⁻¹. Similar comportamiento presentó el carbono total arriba del suelo en el TUT BP, siendo 9,3 veces superior al valor promedio para esta variable en los restantes TUT. De igual manera, el valor del COS del BP fue 1,4 veces mayor que el valor promedio de los TUT intervenidos. Sin embargo y como se indicó antes, los TUT BP y PAD presentaron valores similares de COS hasta la profundidad estudiada (Figura 16).

Debido a que el TUT BP no presentó intervención antropógena, se consideró como referencial (control positivo) en cuanto al contenido de carbono total en el sistema, y se obtuvo que los TUT PCL, BF y CAZ almacenaron entre el 27 al 29% del carbono total presente en el BP. Mientras que en el TUT PAD, representó el 43% del carbono total almacenado en el BP (Cuadro 32).



Donde: Donde: La hojarasca corresponde a residuos con diámetro ≤ 2 cm, ^b Corresponde a residuos de madera gruesa (residuos con diámetro > 2 cm), BP= bosque primario, PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar y PAD: pastura con árboles dispersos.

Figura 16. Distribución del carbono total por tipo de uso de la tierra, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

El carbono total almacenado en la biomasa aérea de los arbustos de *L. leucocephala* en el TUT PCL ($0,72 \text{ Mg ha}^{-1}$), fue de aproximadamente 6 y 25 veces menor que el carbono almacenado en el componente leñoso de los TUT BF (*G. sepium*) y PAD, respectivamente.

No obstante, al comparar el valor obtenido, con el reportado por Arias et ál. (2001) en los mismos suelos para una pastura en callejones de *G. sepium* (con $2.204 \text{ plantas ha}^{-1}$, altura de poda = 1 m y 2,5 años de edad), la cual corresponde al uso anterior de este suelo, se observó que el carbono almacenado en *L. leucocephala* (especie actual con $1.861 \text{ plantas ha}^{-1}$, altura de poda = 0,98 m y 5 años de edad) fue aproximadamente dos veces mayor con respecto al almacenado en *G. sepium* (especie inicial del TUT). Las diferencias observadas

podieron ser debidas a la especie y a la mayor edad de los arbustos de *L. leucocephala*, aunque la densidad en este caso fue 15,6% menor.

El carbono total almacenado en la biomasa aérea de *G. sepium* en el TUT BF ($4,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) fue seis veces mayor que el obtenido por Arias et ál. (2001) en el uso anterior de estos suelos como cultivo en callejones de *G. sepium* y *M. esculenta* ($0,653 \text{ Mg ha}^{-1}$). De manera similar al caso anterior, las diferencias en los valores pudieron ser debidas a que con el cambio de uso del suelo, la densidad de siembra de *G. sepium* se incrementó en 169% respecto al uso anterior. Además, para el momento del presente estudio los arbustos presentaron mayor edad (5 y 8 años) que los evaluadas por Arias et ál. (2001), con 2 años de establecidas. Lo cual, debió incidir en una mayor acumulación de biomasa en los tallos y consecuentemente en el carbono total almacenado en esta fracción de la planta.

El valor obtenido de almacenamiento de carbono total en el componente leñoso del BF fue menor que el reportado por Amézquita et ál. (2008) en bancos forrajeros multiespecíficos en El Dovio (17 Mg ha^{-1})¹⁶ y en Dagua (18 Mg ha^{-1})¹⁷, localidades ubicadas en las zonas altoandinas de Colombia. En los dos casos referidos, los valores incluyeron el carbono almacenado en las raíces gruesas, mientras que en el presente estudio no fue considerada esta fracción de la planta.

En el caso del TUT CAZ, considerado en este estudio como un banco forrajero de gramíneas, el almacenamiento de carbono total observado en la biomasa aérea ($14,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) fue mayor que el obtenido por Ibrahim et ál. (2007) para *Pennisetum purpureum* ($6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$) en condiciones climáticas similares en Matiguás, Nicaragua. La diferencia encontrada pudo ser debida a las especies y al manejo aplicado. En ambos casos, se debe tener presente que este carbono es de carácter temporal, ya que que periódicamente se exporta del sistema para su uso en alimentación animal.

¹⁶ *Trichantera gigantea*, *Morus* spp., *Erithrina edulis*, *Boehmeria nivea* y *Thitonia diversifolia*.

¹⁷ *Trichantera gigantea*, *Morus* spp., *Erithrina fusca* y *Thitonia diversifolia*.

Diversos estudios realizados en el Trópico en diferentes zonas de vida, asociando diferentes especies de gramíneas y árboles (Andrade 1999, Mora 2001, Ruiz 2002, Ramos 2003, Ibrahim et ál. 2007, Amézquita et ál. 2008, Andrade et ál. 2008) han demostrado el potencial de las pasturas mejoradas asociadas con árboles para la producción ganadera y la generación de otros servicios ambientales, tales como conservación de agua y biodiversidad.

El carbono almacenado en la biomasa aérea de los árboles del TUT PAD (18 Mg ha^{-1}) en algunos casos fue mayor que el obtenido por otros autores en condiciones de Bosque Seco Tropical. Ruiz (2002), trabajando en Nicaragua con las gramíneas introducidas *B. brizantha*, *P. máximum*, *Cynodon dactylon* y árboles dispersos a alta densidad obtuvo en promedio $12,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$; mientras que al evaluar pastos nativos con árboles en similar densidad, encontró $8,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

Rojas (2005), evaluó en Guanacaste, Costa Rica, pasturas de *B. brizantha* en asocio con árboles de *S. saman*, *D. robinoides* y *D. retusa* de tres años edad, reportó valores de 0,32; 4,04 y $1,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectivamente. Mientras que al evaluar *Hyparrhenia rufa* con las mismas especies arbóreas obtuvo valores de 0,91; 4,39 y $0,55 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectivamente. Se encontró que la especie maderable de mayor almacenamiento de carbono fue *D. robinoides*.

Amézquita et ál. (2008) evaluaron en Esparza, Costa Rica, *B. brizantha* en asocio con árboles y obtuvo $17,20 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Ramos (2003) obtuvo en esta misma localidad, 62,59 y $2,98 \text{ Mg C ha}^{-1}$ para pasturas mejoradas con árboles y pasturas degradadas, respectivamente. En la pastura mejorada el aporte del componente leñoso al almacenamiento de carbono fue de 95,6%, mientras que en la pastura degradada fue de 41,9%. La diferencia en el aporte de biomasa entre los componentes de los sistemas de uso de la tierra se debió a la diferente densidad de árboles en cada sistema.

Los resultados presentados demuestran que en los agrosistemas evaluados, el suelo desempeña un papel importante como reservorio o sumidero de carbono; mientras que en las áreas bajo cobertura boscosa, el componente arbóreo constituyó un compartimiento

importante para el almacenamiento de carbono. La relación COS / C total del sistema (Cuadro 33) para los diferentes TUT estudiados mostró que:

- a. En el TUT BP, el COS fue aproximadamente un tercio del carbono total del sistema, consecuentemente se evidencia la importancia de la cobertura boscosa en el almacenamiento de carbono.
- b. En los TUT PCL y BF el COS representó aproximadamente el 90% del carbono total del sistema. Lo que demuestra la importancia de este compartimiento en el almacenamiento de carbono en estos sistemas.
- c. En el TUT CAZ el COS correspondió al 60% del carbono total en el sistema. Sin embargo, se debe tener presente que en este TUT el carbono total arriba del suelo es de carácter temporal debido a la especie de planta (gramínea) y al manejo aplicado (banco forrajero de gramíneas); lo cual determina que luego de la cosecha, el carbono total en el suelo constituya cerca del 100% del carbono presente en el sistema. Se estima que la cosecha sin quema del cultivo contribuye de manera importante al flujo de carbono al suelo a través de la hojarasca que es dejada como cobertura. Además del aporte realizado por las raíces del cultivo.
- d. En el TUT PAD el COS equivale al 77% del carbono total observado en el sistema.

Cuadro 33. Relación carbono orgánico en el suelo - carbono total, bajo diferentes TUT, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

TUT	COS (Mg ha ⁻¹)	C total arriba del suelo (Mg ha ⁻¹)	C total en el sistema (Mg ha ⁻¹)	COS / C total
BP	79,24	153,96	233,20	0,34
PCL	58,22	5,83	64,05	0,91
BF	54,27	12,73	67,00	0,87
CAZ	39,04	24,75	63,79	0,61
PAD	77,53	23,16	100,69	0,77

Donde: BP= bosque primario, PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar y PAD= pastura con árboles dispersos.

4.8 Fijación de carbono en la biomasa aérea y el suelo

La tasa promedio de fijación de carbono obtenida en la biomasa aérea de los componentes leñosos en los sistemas evaluados fue de 1,21 Mg ha⁻¹ año⁻¹; mientras que los valores obtenidos variaron entre 0,14 y 2,79 Mg ha⁻¹ año⁻¹, correspondiendo el mayor valor a los árboles del TUT PAD y el menor valor a *L. leucocephala* en el TUT PCL (Cuadro 34). Distintos factores pudieron influir en las diferencias observadas entre sistemas. Entre ellas se pueden considerar las condiciones de sitio, especie y edad de los árboles, densidad de siembra y manejo aplicado.

La tasa de fijación de carbono obtenida para la biomasa aérea de *L. leucocephala* (0,14 Mg ha⁻¹ año⁻¹) fue ligeramente superior a la reportada por Arias et ál. (2001) para una pastura en callejones de *G. sepium* y *C. nlemfuensis* (0,12 Mg ha⁻¹ año⁻¹) en los mismos suelos. Sin embargo, fue inferior al valor reportado por Kursten y Burschel (1993) en una plantación de *L. leucocephala* (2,0 Mg ha⁻¹ año⁻¹) destinada para leña en Centroamérica.

Integrando el componente arbóreo en el TUT BF, la tasa de fijación de carbono en la biomasa aérea de las plantas de *G. sepium* de 5 y 8 años de edad, con una densidad de siembra de 5.329 árboles ha⁻¹, fue de 0,70 Mg ha⁻¹ año⁻¹; valor similar al reportado por Kursten y Burschel (1993) para una plantación de la misma especie, establecida a una densidad de 330 árboles ha⁻¹ y destinada para sombra. Por su parte, Arias et ál. (2001) obtuvieron en los mismos suelos, pero en un cultivo en callejones de *G. sepium* y *M. esculenta*, una tasa de fijación de 0,33 Mg ha⁻¹ año⁻¹. En la situación antes expuesta, se evidenció que el cambio de tipo de uso del suelo, de cultivo en callejones a banco forrajero de *G. sepium*, permitió incrementar la tasa de fijación en la biomasa arbórea de *G. sepium* aproximadamente en 200%.

En los TUT PCL y BF debe considerarse que la tasa de fijación de *L. leucocephala* y *G. sepium*, está referida al carbono de mayor estabilidad y fijado en el tallo o fuste principal de las plantas; las cuales, por efecto de manejo (poda periódica en ambas especies y ramoneo por bovinos en *L. leucocephala*) presentaron diferentes alturas al punto de poda. En el caso de *L. leucocephala* esta varió entre 0,95 y 1,08 m (Cuadro 15), mientras que en *G. sepium*

fue de 1,18 a 1,50 m y de 1,49 a 1,63 m para plantas de 5 y 8 años de edad (Cuadro 16), respectivamente. Además, la densidad de siembra de *G. sepium* fue aproximadamente 3 veces mayor¹⁸ que la de *L. leucocephala*. En consecuencia, era de esperarse que *G. sepium* presentara mayor tasa de fijación de carbono que *L. leucocephala*.

Cuadro 34. Fijación de carbono en el componente arbóreo de diferentes TUT del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

TUT	Componente	Densidad (árboles ha ⁻¹)	C almacenado (Mg ha ⁻¹)	Tasa de fijación de C (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Remoción de CO ₂ e (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
PCL	<i>L. leucocephala</i>	1861 ± 280	0,72	0,14	0,53
BF	<i>G. sepium</i> (5) ^a	4440 ± 1194	2,43	0,49	2,53
	<i>G. sepium</i> (8) ^a	889 ± 140	1,64	0,21	
PAD	Árboles	120 ± 46	14,40	2,79	10,23

Donde: PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero y PAD= pastura con árboles dispersos. ^a Valor referido a la edad de las plantas en años.

La tasa de fijación estimada para la biomasa aérea de árboles en el TUT PAD fue mayor a la reportada por Kursten y Burschel (1993) para *Alnus acuminata* en potreros en Centroamérica (0,1 Mg ha⁻¹ año⁻¹).

Andrade (1999) evaluó asociaciones de *A. mangium* y *Eucalyptus deglupta* con pasturas mejoradas (*B. brizantha*, *Brachiaria decumbens* y *P. maximum*) en una zona de Bosque Húmedo Tropical de Costa Rica y obtuvo tasas de fijación de carbono en la biomasa aérea de 1,75 y 1,80 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente.

Rojas (2005), encontró en Costa Rica tasas de fijación para árboles jóvenes (51 meses de edad) de *S. saman*, *D. robinoides* y *D. retusa* de 0,15; 0,27 y 1,05 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Por su parte Andrade et ál. (2008), en el mismo sitio y con las mismas especies arbóreas, reportaron tasas de fijación de carbono en la biomasa aérea que variaron de 0,8 a 2,9 Mg ha⁻¹ año⁻¹, para pasturas *H. rufa* y *B. brizantha* en monocultivo y en sistemas

¹⁸ Considerando las plantas de *G. sepium* de 5 y 8 años de edad.

silvopastoriles con *S. saman*, *D. robinoides* y *D. retusa*. Para ambas gramíneas se observó mayor tasa de fijación de carbono con la presencia de árboles.

La tasa promedio de fijación de COS, hasta 15 cm de profundidad equivalente, en los TUT evaluados fue de 1,24 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Los valores obtenidos se ubicaron en un ámbito entre 0,82 y 1,86 Mg COS ha⁻¹ año⁻¹, la mayor tasa de fijación de COS correspondió al TUT BF, mientras que la menor fue para PCL (Cuadro 35). De acuerdo con los resultados, en este estudio se destacó el hecho de que todos los suelos, en mayor o menor medida, fijaron carbono durante el período evaluado.

Cuadro 35. Fijación de carbono orgánico del suelo de diferentes TUT del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 1999-2005.

TUT	Profundidad (cm)	COS (2005) (Mg ha ⁻¹)	COS (UCV 1999) (Mg ha ⁻¹)	Tasa de fijación (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Remoción de CO ₂ e (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
PCL	0-15	21,02	16,12	0,82	2,99
BF		22,37	11,16	1,86	6,82
CAZ		20,06	13,14	1,15	4,23
PAD		38,40	31,74	1,11	4,07

Donde: PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero y PAD= pastura con árboles dispersos.

La mayor tasa de fijación de COS encontrada en el TUT BF, pudo estar asociada con el aporte de materia orgánica al suelo a través de la necromasa; generada en forma natural y por la poda de los arbustos, ya que al momento de la cosecha en el BF se realiza el deshoje y los tallos leñosos se esparcen entre las hileras del cultivo; el control de malezas y el aporte realizado por las raíces muertas de *G. sepium*.

Estudios realizados por Amézquita et ál. (2008) en diferentes zonas de vida y tipos de uso de la tierra en Colombia y Costa Rica mostraron variaciones en cuanto a la tasa de fijación de carbono entre sistemas. En zonas de laderas andinas en Colombia, estos autores obtuvieron tasas de fijación de carbono entre 0,4 y 1,6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para bancos forrajeros, mientras

que para pasturas de brachiaria híbrido “Mulato” en monocultivo y en asocio con *Arachis pintoii*, encontraron valores entre -3,3 y 11,2 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente.

Amézquita et ál. (2008) en la Amazonía colombiana obtuvieron tasas de fijación de carbono de 3,4 a 5,5 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en bancos forrajeros y de 1,8 a 7,7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para pasturas de brachiaria híbrido CIAT 4624 en monocultivo y en asociación con *A. pintoii*. También, los autores mencionados, trabajando en Costa Rica, obtuvieron tasas de fijación de carbono de 2,0 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para un banco forrajero de *C. argentea*, y de 3,5 a 4,1 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para pasturas de *B. brizanta* en monocultivo y en asocio con *A. pintoii*.

La tasa de fijación de COS obtenida en el TUT PCL fue inferior a la reportada en el estudio de Arias et ál. (2001), en los mismos suelos pero en una pastura en callejones de *C. nlemfuensis* y *G. sepium*. En el caso de las pasturas, se considera que el carbono acumulado en el suelo se origina a partir la descomposición de la materia orgánica proveniente de la hojarasca, las raíces del pasto (Fisher y Trujillo 2000) y los árboles, y el aporte de las excretas de los animales (Mora 2001).

Los resultados obtenidos de fijación de COS en este estudio al compararlos con los reportados por Amézquita et ál. (2008) son alentadores, ya que los datos de estos autores corresponden a un metro equivalente de profundidad; en tanto que, en el presente estudio corresponden sólo a 15 cm de profundidad. De haberse estimado la fijación de COS hasta un metro de profundidad, los valores se hubiesen incrementado en gran medida.

A escala de sistema, la tasa de fijación de carbono total (carbono en la biomasa aérea + COS) varió, presentando un valor promedio de 2,14 Mg ha⁻¹ año⁻¹, con valores extremos de 0,96 y 3,90 Mg ha⁻¹ año⁻¹, para los TUT PCL y PAD, respectivamente. En los TUT PCL, BF y CAZ, el mayor aporte a la tasa de fijación lo tuvo el COS con el 85, 62 y 100%, respectivamente. Mientras que en el TUT PAD correspondió a la biomasa aérea con 72%.

Visto en términos de remoción de CO₂ de la atmósfera, los sistemas evaluados removieron entre 3,52 y 14,30 Mg CO₂ ha⁻¹ año⁻¹. Lo que denota la importancia de los sistemas

silvopastoriles en su contribución a la mitigación de las emisiones de GEI en sistemas ganaderos. Los resultados obtenidos, evidencian que en sistemas con intervención antrópica el suelo es un importante sumidero de carbono, tal como lo demuestran otros estudios (Lal 2001, Ruiz 2002, Ramos 2003, Ibrahim et ál. 2007, Amézquita et ál. 2008, Andrade et ál. 2008).

4.9 Análisis multivariado de las variables del suelo

Debido a la alta variabilidad de los suelos del área (Zambrano 1986, UCV 1999, Torres y Madero 1999, Rey et ál. 2005) y con base en los resultados de este estudio; se aplicaron técnicas de análisis multivariado para describir y analizar la variabilidad de los parámetros físicos y químicos de los suelos evaluados, lo que permitió agruparlos de acuerdo a su similitud o cercanía entre grupos.

4.9.1 Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados mostró diferencias intra y entre grupos de suelos, permitiendo diferenciar entre tres y cuatro grupos por estrato de suelo evaluado (Figuras 17 y 18). Con base en los resultados del análisis de conglomerados y considerando las repeticiones por TUT, se observaron las siguientes tendencias:

En la profundidad 0-5 cm, se formaron 3 grupos de suelos (Figura 17 a). El grupo 1 conformado en un 100% por repeticiones del TUT PAD. En el segundo grupo, se distribuyeron en un 40, 40 y 20% las repeticiones de los TUT CAZ, BF y PCL, respectivamente. Mientras que el grupo 3, lo conformaron en 57, 29 y 14% repeticiones de los TUT BP, PCL y PAD, respectivamente. En la profundidad 5-20 cm, algunos de los grupos formados mantuvieron cierta consistencia con los de la profundidad anterior. El grupo 1 fue constituido en un 100% por repeticiones del TUT PAD; en el grupo 2, predominaron las repeticiones de los TUT BF y CAZ, con 80% entre ambos. El grupo 3, fue en un 100% conformado por repeticiones del TUT BP. En contraste con la profundidad anterior, se formó un cuarto grupo con 75 y 25% de repeticiones de los TUT PCL y BP, respectivamente (Figura 17 b).

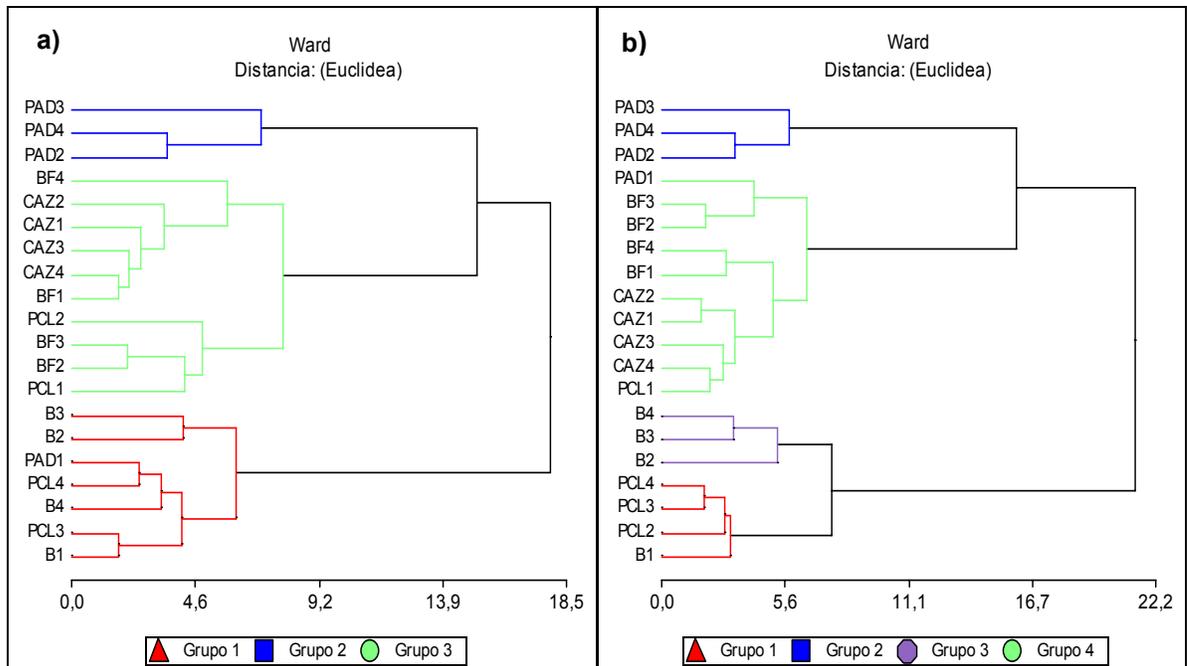


Figura 17. Dendrograma de agrupamiento de suelos por TUT para las profundidades: a) 0-5 cm (correlación cofenética = 0,539) y b) 5-20 cm (correlación cofenética = 0,651), San Javier, Yaracuy, Venezuela.

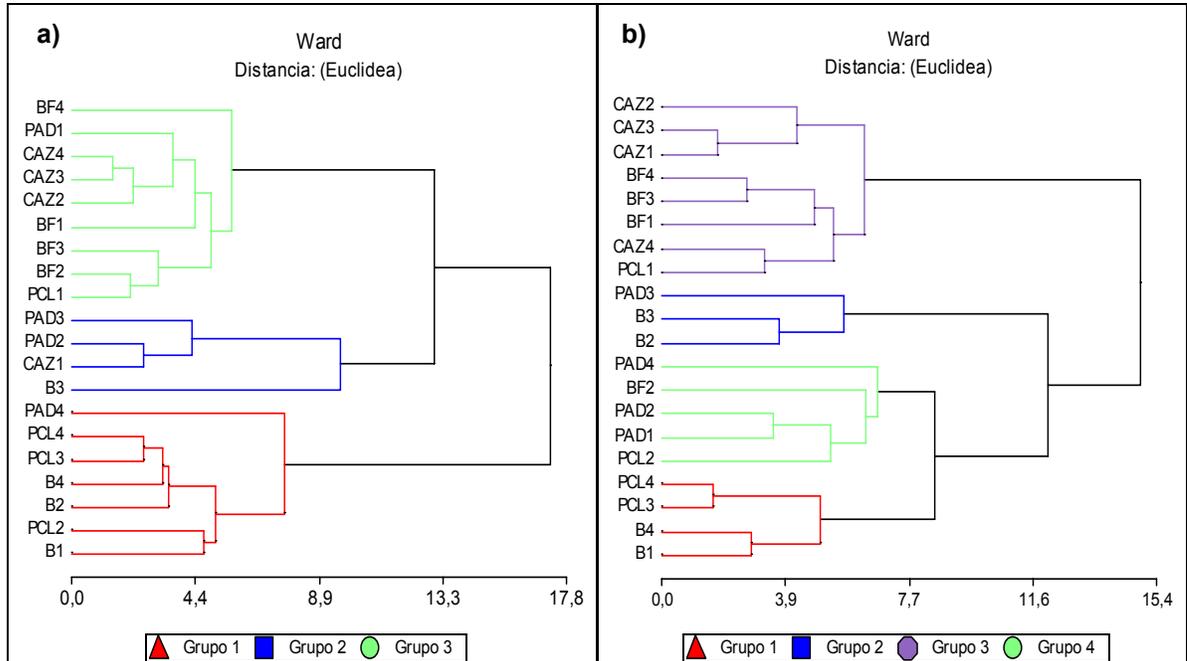


Figura 18. Dendrograma de agrupamiento de suelos por TUT para las profundidades: a) 20-40 cm (correlación cofenética = 0,549) y b) 40-100 cm (correlación cofenética = 0,517), San Javier, Yaracuy, Venezuela.

En la profundidad 20-40 cm se formaron tres grupos. El primero reunió repeticiones de los TUT BF y CAZ con el 45 y 33%, respectivamente, y lo complementaron PAD y PCL con 22%. El grupo 2, se formó con 50, 25 y 25% de los TUT PAD, CAZ y BP, respectivamente. El grupo 3 (de manera similar a la profundidad 0-5 cm), fue integrado con 43, 43 y 14% de repeticiones de los TUT BP, PCL y PAD, respectivamente (Figura 18 a).

La profundidad 40-100 cm presentó cuatro grupos (Figura 18 b). El grupo 1 mantuvo unidos a los TUT CAZ y BF con el 88% de las repeticiones. El grupo 2 presentó un 67 y 33% de repeticiones de los TUT PAD y BP. En el grupo 3 predominó el TUT PAD con 60% de las repeticiones; mientras que el grupo 4, lo conformaron en igual proporción repeticiones de los TUT PCL y BP.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los suelos de los TUT BF y CAZ fueron los de menor variabilidad y a la vez mostraron mayor cercanía entre sí. Los suelos del TUT BP, con la excepción de la capa más profunda, mostraron baja variabilidad y en todos los estratos mostraron cercanía a los del TUT PCL. Los suelos del TUT PAD, en las dos primeras y última capa mostraron menor variabilidad; mientras que en la capa de 20 a 40 cm fueron más variables. De manera general, los suelos del TUT PCL tendieron a una mayor variabilidad que el resto de los suelos evaluados.

Es importante recalcar que de acuerdo con la clasificación taxonómica, los suelos de los TUT BP y BF presentan características del orden Inceptisoles; mientras que, los de los TUT PCL, CAZ y PAD corresponden a Alfisoles (Cuadro 2). En los Anexos 15, 16, 17 y 18 se presentan las características de los grupos de suelos formados mediante el análisis de conglomerados y el análisis de componentes principales para las profundidades estudiadas. También, se muestran para los dos primeros componentes principales (CP) las coordenadas de los grupos de suelos formados por cada profundidad.

4.9.2 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) determinó la asociación entre las variables físico-químicas del suelo en los diferentes estratos (0-5, 5-20, 20-40 y 40-100 cm), de los TUT bajo estudio (Cuadros 36, 37, 38 y 39).

Mediante la construcción de combinaciones lineales entre las variables originales (Zapata et ál. 2003), el ACP permitió analizar las relaciones entre las variables originales del suelo y su dependencia del tipo de uso de la tierra (Buurman et ál. 2008), determinando el factor o componente principal (Zapata et ál. 2003). A continuación se señalan los aspectos más relevantes observados:

a. Profundidad 0- 5 cm

Para la profundidad 0-5 cm, el ACP mostró que los tres primeros componentes principales (CP) explicaron el 83% de la variación de las variables originales del suelo (Cuadro 36). El CP1 recogió el 49% de la variabilidad y las variables de mayor importancia fueron el contenido de arena, la proporción de macroporos, la Ks, los contenidos de Ca y Mg, la CIC y el contenido de arcilla.

El CP2 representó el 23% de la variabilidad y las variables más importantes fueron pH, contenido de P, Da, arcilla, COS, CE y los contenidos de S y N. El CP3 explicó el 11% de la variabilidad y se formó por la contribución de las variables Da, contenido de N, arena y K, proporción de macroporos y pH.

Cuadro 36. Resumen del análisis de componentes principales para las variables del suelo de 0 a 5 cm de profundidad, bajo diferentes TUT en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Variable	Componente principal (variabilidad %)		
	1 (49,0)	2 (23,0)	3 (11,0)
Da (Mg m ⁻³)	0,05	-0,22	-0,61
Arena (%)	-0,32	0,19	-0,07
Arcilla (%)	0,29	-0,21	0,06
P (mg kg ⁻¹)	0,24	-0,26	0,05
K (mg kg ⁻¹)	0,13	-0,08	0,63
Ca (mg kg ⁻¹)	0,33	-0,10	0,12
Mg (mg kg ⁻¹)	0,33	0,06	-0,05
N total (mg kg ⁻¹)	0,28	0,26	-0,11
S (mg kg ⁻¹)	0,22	0,38	-0,01
COS (mg kg ⁻¹)	0,19	0,42	-0,02
pH	0,16	-0,39	0,24
CE (ds m ⁻¹)	0,13	0,42	0,09
CIC (cmol kg ⁻¹)	0,33	0,17	-0,02
Poros $\Theta < 15 \mu\text{m}$ (%)	0,32	-0,01	-0,07
Poros $\Theta > 15 \mu\text{m}$ (%)	-0,27	0,18	0,29
Ks (cm h ⁻¹)	-0,17	0,10	0,19

b. Profundidad 5- 20 cm

De manera similar que en el caso anterior, para la profundidad 5-20 cm, el ACP mostró que los tres primeros CP explicaron el 83% de la variación de las variables originales de suelos (Cuadro 37). El CP1 contribuyó con el 52% de la variabilidad y las variables de mayor importancia fueron el contenido de arena, la proporción de macroporos, la CIC, la proporción de microporos, los contenidos de Mg, Ca y arcilla. El CP2 recogió el 23% de la variabilidad y las variables de mayor influencia fueron el contenido de P, Da, pH, los contenidos de COS y S y la CE. El CP3 explicó el 8% de la variabilidad y se formó por la contribución de las variables Ks, contenido de K, la proporción de macroporos y los contenidos de Mg y arcilla.

Cuadro 37. Resumen del análisis de componentes principales para las variables del suelo de 5 a 20 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Variable	Componente principal (variabilidad %)		
	1 (52,0)	2 (23,0)	3 (8,0)
Da (Mg m ⁻³)	-0,02	-0,38	0,26
Arena (%)	-0,29	0,19	0,12
Arcilla (%)	0,30	-0,07	-0,06
P (mg kg ⁻¹)	0,13	-0,39	0,07
K (mg kg ⁻¹)	0,25	-0,09	0,40
Ca (mg kg ⁻¹)	0,30	-0,21	0,13
Mg (mg kg ⁻¹)	0,32	0,10	-0,08
N total (mg kg ⁻¹)	0,27	0,18	0,20
S (mg kg ⁻¹)	0,26	0,30	0,00
COS (mg kg ⁻¹)	0,18	0,43	0,08
pH	0,22	-0,36	0,08
CE (ds m ⁻¹)	0,25	0,31	-0,03
CIC (cmol kg ⁻¹)	0,33	0,10	0,00
Poros $\Theta < 15 \mu\text{m}$ (%)	0,32	0,02	-0,02
Poros $\Theta > 15 \mu\text{m}$ (%)	-0,24	0,23	0,24
Ks (cm h ⁻¹)	-0,10	0,11	0,78

c. Profundidad 20- 40 cm

Para la profundidad 20-40 cm los tres primeros CP explicaron el 72% de la variación de las variables originales de suelos (Cuadro 38). El CP1 recogió el 34% de la variabilidad y fue formado por las variables contenido de arena, Da, contenido de arcilla, CIC, CE y contenidos de S y COS. El CP2 explicó el 27% de la variabilidad y las variables de mayor importancia fueron COS, contenido de arena, macroporos, pH, Ca y K. El CP3 explicó el 11% de la variabilidad y se formó por las variables Da, N total, microporos, macroporos y Mg.

Cuadro 38. Resumen del análisis de componentes principales para las variables del suelo de 20 a 40 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Variable	Componente principal (variabilidad %)		
	1 (34,0)	2 (27,0)	3 (11,0)
Da (Mg m ⁻³)	-0,19	0,18	-0,46
Arena (%)	-0,30	-0,19	-0,03
Arcilla (%)	0,40	0,04	-0,11
P (mg kg ⁻¹)	-0,05	0,32	-0,01
K (mg kg ⁻¹)	0,04	0,40	-0,01
Ca (mg kg ⁻¹)	0,01	0,45	0,14
Mg (mg kg ⁻¹)	0,28	0,24	0,28
N total (mg kg ⁻¹)	0,23	0,10	-0,42
S (mg kg ⁻¹)	0,34	-0,17	-0,16
COS (mg kg ⁻¹)	0,29	-0,28	-0,12
pH	-0,01	0,45	0,16
CE (ds m ⁻¹)	0,34	-0,17	0,16
CIC (cmol kg ⁻¹)	0,39	0,12	0,14
Poros $\Theta < 15 \mu\text{m}$ (%)	0,32	0,11	-0,32
Poros $\Theta > 15 \mu\text{m}$ (%)	0,09	-0,19	0,53
Ks (cm h ⁻¹)	0,02	-0,10	-0,12

d. Profundidad 40-100 cm

En la profundidad 40 -100 cm los cuatro primeros CP explicaron el 78% de la variación de las variables originales del suelo (Cuadro 39). El CP1 explicó el 29% de la variabilidad y se formó por la contribución de las variables pH, K, N, S, COS y CE. El CP2 recogió el 26% de la variabilidad, y las variables de mayor peso fueron Mg, CIC, arcilla, arena, macroporos y Ks. Por su parte, el CP3 explicó el 14% de la variabilidad y las variables de mayor importancia fueron macroporos, CE, Ca, Da, arcilla y N total. El CP4 explicó el 9% de la variabilidad y se formó por las variables Ca, microporos, COS, P, Da y CE.

Con base en los resultados obtenidos, se estima que parte de la variabilidad existente entre los suelos bajo estudio puede explicarse mediante la combinación lineal de las variables en tres o a lo sumo cuatro componentes principales, según el estrato analizado.

Los tres o cuatro primeros componentes principales reflejaron entre el 72 y 83% de la variación total acumulada, es decir, de la estructura de varianza y covarianza de los datos originales. También, se observó que por cada estrato evaluado y en cada componente principal generado se presentaron variables físicas y químicas de suelos que otorgaron

mayor peso en la explicación de la variabilidad observada y la correlación entre ellas. Entre las variables físicas destacaron los contenidos de arena y arcilla, Da, Ks y la proporción de macroporos. Mientras que en las químicas, la mayor incidencia fue de COS, Ca, Mg, S, pH y CIC.

Cuadro 39. Resumen del análisis de componentes principales para las variables del suelo de 40 a 100 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Variable	Componente principal (variabilidad explicada %)			
	1 (29,0)	2 (26,0)	3 (14,0)	4 (9,0)
Da (Mg m ⁻³)	-0,12	0,08	0,54	0,33
Arena (%)	-0,06	0,47	-0,03	0,13
Arcilla (%)	0,21	-0,32	0,31	0,03
P (mg kg ⁻¹)	-0,21	-0,13	-0,19	0,45
K (mg kg ⁻¹)	-0,34	-0,20	0,16	-0,10
Ca (mg kg ⁻¹)	-0,24	-0,20	-0,28	-0,41
Mg (mg kg ⁻¹)	-0,05	-0,40	-0,16	0,26
N total (mg kg ⁻¹)	-0,30	-0,04	0,24	-0,22
S (mg kg ⁻¹)	0,43	-0,02	-0,05	0,08
COS (mg kg ⁻¹)	0,36	0,12	0,09	-0,33
pH	-0,34	-0,29	-0,15	-0,04
CE (ds m ⁻¹)	0,29	-0,09	-0,34	0,27
CIC (cmol kg ⁻¹)	0,23	-0,38	0,00	0,07
Poros $\Theta < 15 \mu\text{m}$ (%)	0,22	-0,25	0,07	-0,41
Poros $\Theta > 15 \mu\text{m}$ (%)	-0,09	0,26	-0,47	-0,12
Ks (cm h ⁻¹)	-0,03	0,18	0,12	-0,10

A partir de lo antes expuesto, y tomando como ejemplo el estrato de 0 a 5 cm, se obtuvo que en el CP1 las variables de mayor peso, arena y CIC presentaron valores extremos de -0,32 y 0,33, respectivamente (Cuadro 37). En el CP2 las variables de mayor peso fueron pH y CE y presentaron valores de -0,39 y 0,42, respectivamente; mientras que en el CP3 las variables de mayor incidencia fueron Da y K con valores de -0,61 y 0,63, respectivamente (Cuadro 36).

El análisis de conglomerados mostró la conformación de diferentes grupos por estrato evaluado, lo que podría sugerir que no hubo un patrón específico para la conformación de estos y que el tipo de uso de la tierra no explica en su totalidad el comportamiento del COS. De acuerdo a las evidencias observadas, es probable que factores como procesos formadores, historia de uso y manejo actual; fueron determinantes en la alta variabilidad observada en estos suelos.

4.10 Emisiones de gases de efecto invernadero en el subsistema bovinos doble propósito

4.10.1 Características del rebaño

La población promedio y el flujo de animales del rebaño de bovinos de doble propósito del MF-ATS durante el período 2003-2005 se presenta en el Cuadro 41. Con la finalidad de reflejar la dinámica de los animales en el rebaño y tener mayor precisión en la estimación de las emisiones, en lugar de tomar el valor promedio, se consideró el número de animales que efectivamente hubo en el rebaño durante el año en cada grupo etario (Cuadro 41).

En cuanto a la composición del rebaño, la mayor proporción de bovinos estuvo representada por animales menores de 2 años con 46%, seguidos por las vacas con 43%; mientras que, los animales de reemplazo y el toro representaron el 9% y 2% del total, respectivamente. Para el período 2003-2005, el porcentaje de pariciones fue de 75% (Cuadro 42); lo que indica que del total de vacas, en promedio 18 de ellas parieron durante el período evaluado, y un 25% no lo hicieron; en consecuencia, estas últimas no contribuyeron con la producción de la finca.

Las ventas de animales representaron un componente importante del flujo de semovientes del rebaño. En general, se vendieron vacas de descarte, hembras jóvenes destinadas para la cría por ganaderos de la zona; y los machos, desde el destete hasta un año de edad, fueron vendidos para el levante y engorde. Por otra parte, el toro se cambia cada tres a cuatro años para evitar problemas de consanguinidad y se ofrece como semental para ser utilizado en otro rebaño. Consecuentemente, se adquiere otro ejemplar para sustituir al saliente. La mortalidad fue de 5%, y afectó principalmente a los animales menores de un año y a las vacas.

Cuadro 40. Población y composición del rebaño de bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.

Grupo etario	Vacas	Toro	Novillas	Hembras ^a (1- 2 años)	Becerras	Beceros	Total
Inventario inicial	20 ± 0,6	1 ± 0,0	3 ± 4,2	5 ± 3,0	10 ± 2,3	6 ± 2,7	45 ± 5,9
Nacimientos					10 ± 5,2	8 ± 5,1	18 ± 9,3
Cambios -			3 ± 3,1	4 ± 2,7	7 ± 2,5	0	15 ± 2,3
Cambios +	3 ± 3,1		4 ± 2,7	7 ± 2,5			15 ± 2,3
Compras	0	0,3 ± 0,6	1 ± 1,7	0	0	0,3 ± 0,6	1 ± 2,1
Ventas	2 ± 1,7	0,3 ± 0,6	1 ± 1,2	3 ± 2,7	3 ± 1,5	8 ± 1,5	17 ± 7,8
Muertes	1 ± 0,6	0	0	0	1 ± 1,2	0,3 ± 0,6	2 ± 0,6
Inventario final^b	20 ± 0,6	1 ± 0,0	4 ± 3,2	5 ± 2,5	8 ± 3,1	6 ± 2,7	44 ± 6,1
Animal en rebaño	24	1	5	8	10	8	56
Proporción (%)	43	2	9	14	18	14	100

Donde: a En Venezuela, se denominan comúnmente como mautas. b Valores expresados como promedio ± desviación estándar.

Los parámetros productivos y reproductivos del rebaño bovino, para el periodo 2003-2005 se presentan en el Cuadro 42. Los valores obtenidos coinciden, y en muchos casos superan, los promedios reportados por diferentes autores para sistemas doble propósito en Venezuela y el trópico americano (Vaccaro et ál. 1991, Noguera et ál. 1994, Martínez y Vaccaro 1996, Ojeda y Escobar 1997, Peña et ál. 1997, Camargo 2001, Sandoval et ál. 2005). Estos valores se utilizaron para estimar las emisiones de GEI del rebaño doble propósito. La productividad del subsistema durante el período 1998-2005, se estimó en 2.595 kg de leche ha⁻¹ año⁻¹ y 172 kg de carne ha⁻¹ año⁻¹ (Añez 2007).

En cuanto a la calidad de la leche producida, para el período 1998-2005 se obtuvieron valores (promedio ± desviación estándar) de 3,75±0,57, 3,38±0,52 y 12,44±0,43% para los parámetros grasa, proteínas y sólidos totales, respectivamente.

Cuadro 41. Parámetros productivos y reproductivos del rebaño de bovinos de doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.

Parámetro	Unidad	Promedio ± DE
Vacas		
Producción total de leche	kg vaca ⁻¹ lactancia ⁻¹	2.069,0
	kg vaca ⁻¹ día ⁻¹	8,2 ± 0,5
Producción de leche vendible	kg vaca ⁻¹ lactancia ⁻¹	1638,0
	kg vaca ⁻¹ día ⁻¹	6,5 ± 0,7
Días en ordeño	días	251 ± 54
Peso antes del parto	kg	531 ± 55
Peso post-parto	kg	472 ± 62
Intervalo entre partos	días	401 ± 36
Pariciones	%	75
Toro		
Peso vivo	kg	782 ± 20
Becerras		
Peso al nacer	kg	32,4 ± 6,0
Consumo de leche	kg día ⁻¹	3,1 ± 0,3
Edad al destete	días	163 ± 26
Peso al destete	kg	94,3 ± 10,4
GDP hasta 120 días	g día ⁻¹	447,0 ± 72,9
Peso a 365 días	kg	154,3 ± 19,7
GDP a 365 días	g día ⁻¹	337,7 ± 67,3
Hembras (1-2 años)		
Peso vivo a 540 días	kg	220,8 ± 21
Ganancia de peso (365 – 540 días)	kg	454 ± 100
Novillas (2-3 años)		
Peso vivo	kg	398 ± 26
Ganancia de peso	g día ⁻¹	490
Edad al primer parto ^a	meses	34,5 ± 6,1
Peso vivo al primer parto ^a	kg	494 ± 38,2

Donde: DE = Desviación estándar, ^a Valores reportados por Añez (2007) para novillas en el rebaño.

4.10.2 Curva de lactancia

Al evaluar tres frecuencias de medición de leche, correspondientes a los intervalos de 7, 14 y 28 días; y de acuerdo con la clasificación de las vacas del rebaño del MF-ATS en cinco grupos según su nivel de producción de leche total y duración de la lactancia (Anexo 3), se obtuvieron 15 curvas de lactancia producto de las combinaciones de frecuencias y grupos (Anexo 19). De las ecuaciones generadas, se seleccionó para su utilización en el modelo *LIFE SIM*, la correspondiente al grupo 3 con frecuencia de medición de 28 días.

La ecuación seleccionada, de acuerdo con el modelo de Wood (1967) se expresó de la siguiente manera:

$$Y = 8,65(t^{0,1136})(e^{-0,00570t}) \quad R^2 = 0,99 \quad \text{[Ecuación 39]}$$

Los criterios considerados para la selección de esta ecuación fueron: a) Frecuencia de medición de leche de 28 días, la cual es de amplia aplicabilidad en sistemas de producción de leche con vacas de doble propósito. b) El valor de la producción total de leche se ajustó adecuadamente al grupo 3 de vacas, las cuales fueron las de mayor proporción de lactancias (42%) en el rebaño durante el período evaluado. c) Alto valor del coeficiente de determinación.

4.10.3 Valor nutritivo de los alimentos

El valor nutritivo de los forrajes y suplementos de la dieta de los diferentes grupos de animales se presenta en el Anexo 20. Los silajes se diferenciaron de acuerdo a la época de suministro y producto procesado. Los pastos se agruparon por sistema (TUT PCL o PAD) y la época del año (seca y lluviosa). En el TUT PCL pastorearon las vacas en producción, las vacas secas y el toro. Mientras que en el TUT PAD pastorearon las hembras mayores de un año y las novillas.

Los valores obtenidos de proteína cruda para los pastos fueron bajos (6,8 - 7,7%) y la digestibilidad *in situ* de las pasturas estuvo en un ámbito entre 50 y 60%; como era de esperarse los mayores valores correspondieron a la época lluviosa. La mayor digestibilidad se observó en la pastura del TUT PAD (*P. maximum*), mientras que para el TUT PCL fue menor (*C. nlemfuensis*, *E. polystachia* y *P. maximum*).

En el caso de los silajes utilizados, se obtuvo valores similares de proteína cruda y energía bruta. Sin embargo, hubo diferencias en cuanto a digestibilidad. En este sentido, la digestibilidad del silaje de yuca fue 29 y 48% mayor que la de los silajes de caña - canavalia y sorgo - canavalia, respectivamente (Anexo 20). Lo anterior, sugiere que factores como especie, manejo agronómico del cultivo y procesamiento postcosecha de los productos pudieron influir en la calidad de estos suplementos.

4.10.4 Emisiones de gases de efecto invernadero en el subsistema bovinos de doble propósito

4.10.4.1 Emisiones de GEI procedentes del ganado

La emisión diaria de CH₄ y N₂O por los bovinos se presenta en el Cuadro 43. En el caso del CH₄ procedente de la fermentación entérica, la mayor emisión por grupo etario correspondió a las novillas, vacas en producción y el toro. La mayor emisión de CH₄ en las novillas podría estar asociada con el consumo de una dieta de menor calidad, que el resto de los animales. Las novillas se encontraban en etapa de gestación; además, por su condición fisiológica aún estaban en crecimiento, lo que pudo incrementar sus requerimientos nutricionales y consecuentemente el consumo de materia seca.

Abreu et ál. (2004) utilizando la técnica del hexafluoruro de azufre (SF₆) evaluaron la emisión de metano en vacas mestizas en Brasil. Para la emisión de metano de origen entérico, se observaron variaciones dependiendo del estado fisiológico del animal y de la época del año; la cual, influyó en la calidad de los forrajes consumidos. Los valores obtenidos para la emisión de metano entérico estuvieron entre 225 a 347 y 204 a 286 g animal⁻¹ día⁻¹ para vacas lactantes y secas, respectivamente. En el presente estudio, la emisión de metano de origen entérico obtenido para las vacas lactantes (261,10 g animal⁻¹ día⁻¹) estuvo dentro del rango reportado por Abreu et ál. (2004). Sin embargo, en el caso de las vacas secas, la emisión de metano entérico fue menor (180,78 g animal⁻¹ día⁻¹) a la reportada por estos autores.

Montenegro y Abarca (2001) obtuvieron valores de producción de metano entérico para animales adultos del hato doble propósito de Costa Rica de 252 y 234 g animal⁻¹ día⁻¹, para los años 1990 y 1996, respectivamente. Este estudio mostró una reducción de las emisiones de 14% con respecto al primer año; lo cual, se asoció a la disminución en 7,6% del rebaño de vacas adultas y al incremento en un 3% de la eficiencia reproductiva del hato.

Cuadro 42. Emisiones de tres gases de efecto invernadero en bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.

Animal	Fermentación entérica	Manejo de las excretas		CO ₂ e (Mg animal ⁻¹ año ⁻¹)
	CH ₄ (g animal ⁻¹ día ⁻¹)	CH ₄ (g animal ⁻¹ día ⁻¹)	N ₂ O (g animal ⁻¹ día ⁻¹)	
Vacas lactantes	261,10	8,38	5,63	2,70
Vacas secas	180,78	4,90	5,51	2,05
Toro	260,00	7,22	7,85	2,94
Novillas	284,61	8,10	3,22	2,61
Hembras (1-2 años)	162,10	4,24	1,15	1,41
Becerras	80,16	2,90	0,77	0,70

Se considera que los niveles de producción de leche en sistemas de ganadería doble propósito son bajos, al compararlos con los sistemas especializados. Sin embargo, las vacas doble propósito emiten cantidades de metano semejantes a las estimadas para vacas en sistemas de carne e inferiores a las de lechería especializada (Montenegro y Abarca 2001).

Un ejemplo de lo anterior, se refleja en el estudio conducido por Mora (2001) en fincas lecheras especializadas en Costa Rica. En el que evaluó el efecto del uso de niveles bajo, medio y alto de insumos sobre la emisión de GEI. Las emisiones de metano de origen entérico fueron de 388 a 470 y de 230 a 248 g animal⁻¹ día⁻¹ para vacas lactantes y secas, respectivamente. Además, se observó que los valores fueron mayores en fincas con alto uso de insumos.

En términos anuales la emisión de metano procedente de la fermentación entérica para las vacas lactantes, vacas secas, toro, novillas y hembras de 1 a 2 años del hato del MF-ATS fue de 95,3; 66,0; 94,9; 103,9 y 59,2 kg CH₄ animal⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Los valores obtenidos para los dos primeros grupos fueron inferiores en 8 y 24%, respectivamente, a los reportados por Abreu et ál. (2004) en Brasil. Sin embargo, para el resto de los grupos de animales, los valores de las emisiones de metano superaron a los reportados por estos investigadores.

Montenegro y Abarca (2001) reportaron valores promedio de emisiones de metano entérico de 86 y 92 kg animal⁻¹ año⁻¹ para animales adultos del rebaño bovino doble propósito de Costa Rica. Mientras que, Mora (2001) para vacas lecheras obtuvo valores en un ámbito entre 130 y 240 kg animal⁻¹ año⁻¹.

En Ropar, India, Kernebeek y Gerber (2008) evaluaron las emisiones de GEI en una finca lechera típica de la zona. Las emisiones de metano entérico obtenidas para todos los grupos etarios de la finca (desde becerros hasta vacas lactantes) estuvieron entre 9,34 y 38,83 kg CH₄ animal⁻¹ año⁻¹, correspondiendo las mayores emisiones a las vacas lactantes y vacas secas. Estos valores, son relativamente bajos y contrastan con los del presente estudio y con los reportados en la literatura (Montenegro y Abarca 2001, Mora 2001, Flessa 2002, Abreu et ál. 2004). Los métodos de estimación de emisiones de GEI aplicados en los estudios analizados presentan variaciones, lo que explica parcialmente las diferencias en los resultados obtenidos.

Con respecto a las emisiones de CH₄ y N₂O generadas por las excretas, se observó que las vacas lactantes y el toro emitieron 41 y 21%, respectivamente, más metano que el promedio general del rebaño (5,96 g animal⁻¹ día⁻¹). Las emisiones de N₂O presentaron similar comportamiento que la variable anterior; pero en este caso el toro y las vacas lactantes emitieron 95 y 40%, respectivamente, más N₂O que el valor promedio del rebaño (4,02 g animal⁻¹ día⁻¹).

Al expresar las emisiones de CH₄ y N₂O de las excretas en valores anuales, se ubicaron en un ámbito de 0,79 a 3,06 y 0,21 a 2,87 kg animal⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Mora (2001) obtuvo en fincas de bajo, medio y alto nivel de uso de insumos valores de emisiones de CH₄ y N₂O de las excretas de 6,59; 8,62 y 13,30 kg CH₄ animal⁻¹ año⁻¹ y 1,33; 1,20 y 1,94 kg N₂O animal⁻¹ año⁻¹. Las mayores emisiones de ambos gases correspondieron a las fincas de alto nivel de uso de insumos. Mientras que en India, Kernebeek y Gerber (2008), evaluando los diferentes grupos etarios de un rebaño bovino, obtuvieron valores de 2,0 a 5,0 y de 3,15 a 15,0 kg animal⁻¹ año⁻¹ de CH₄ y N₂O, respectivamente. Como era de esperarse, en ambas variables los mayores valores correspondieron a los animales adultos.

Las emisiones de gases de las excretas almacenadas son afectadas por el manejo y la duración del almacenamiento. Las mayores emisiones de CH₄ ocurren cuando el estiércol es descompuesto en forma líquida en un ambiente anaeróbico, mientras que cuando se almacena sólido son menores (Flessa et ál. 2002). Como ya se indicó, en el caso bajo estudio, las excretas presentaron dos tipos de manejo. En primer lugar, la deposición de una fracción por los animales durante el pastoreo y luego, el compostaje de la fracción recolectada en los corrales. Los valores presentados tomaron en cuenta ambas situaciones.

En condiciones tropicales la descomposición anaeróbica de las excretas tiene amplio potencial mediante la incorporación de biodigestores en las fincas; lo que contribuiría a la descontaminación de las aguas residuales, aprovechamiento del metano como combustible (reduciendo la presión sobre los bosques por sustitución de la leña), generación de abono orgánico y disminuyendo las emisiones de metano a la atmósfera.

Al relacionar la producción de CH₄ procedente de la fermentación entérica con la leche producida y la ganancia de peso de los animales se generan indicadores que permiten comparar estrategias de manejo alimenticio en y entre fincas. Además, partiendo de una línea base se puede evaluar su evolución en el tiempo y permite la toma de decisiones para lograr sistemas de producción más eficientes en términos de emisiones de GEI.

En este sentido, la relación metano - leche total producida y metano - leche vendible presentó valores con una diferencia de 20% a favor de la segunda relación (Cuadro 43). Esta diferencia se explica por el consumo de leche por el becerro. Mientras que, al relacionar la producción de metano del rebaño con la producción total de leche, se observó que esta es aproximadamente 2,3 veces mayor que la relación metano: leche total producida.

Cuadro 43. Relación entre metano emitido por fermentación entérica y productos generados del subsistema bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Relación	Unidades	Valor
CH ₄ : Producción de leche total	g CH ₄ kg leche total ⁻¹	35,43
CH ₄ : Producción de leche vendible	g CH ₄ kg leche vendible ⁻¹	44,49
CH ₄ rebaño: Producción de leche total	g CH ₄ kg leche total ⁻¹	80,26
CH ₄ : GDP en terneros	g CH ₄ kg PV ⁻¹	237,16
CH ₄ : GDP en hembras (1-2 años)	g CH ₄ kg PV ⁻¹	356,99
CH ₄ : GDP en novillas (2-3 años)	g CH ₄ kg PV ⁻¹	580,84

Donde: GDP= ganancia diaria de peso

El resultado anterior, estuvo directamente relacionado con la composición del rebaño (Cuadro 40). Los resultados muestran que el 43% de los semovientes fueron vacas y de éstas el 75% aportaron a la producción de la finca. Es decir, que durante el período evaluado sólo el 32% de los animales del rebaño contribuyeron con la producción de leche. Pero, no sólo fue leche, además fueron crías que a futuro generaron carne o hembras de reemplazo en la finca. Lo expuesto, evidencia que no debe dejarse a un lado el mejoramiento de los índices reproductivos del rebaño, ya que el 25% de las vacas que no parieron, aportaron el 12,2% (equivalente a 12,28 Mg de CO₂e año⁻¹) de las emisiones de GEI de la finca (Cuadro 44). Además, de competir por espacio y alimento con otros animales, afectando negativamente la eficiencia del sistema.

La relación metano – leche vendible obtenida fue semejante al valor reportado por Cuartas et ál. (2008) en un sistema silvopastoril (48,20 g CH₄ kg leche⁻¹) en una zona de Bosque Seco Tropical en Colombia. Además, el valor reportado por estos autores representó una disminución en la emisión de CH₄ del 9,5% con respecto a la línea base de la finca. En ambos estudios se evidencia la importancia de los sistemas silvopastoriles en la reducción de las emisiones de GEI en sistemas ganaderos.

En estudios desarrollados en Costa Rica se han obtenido diferentes valores para la relación metano – leche vendible. En la mayoría de ellos, los resultados fueron inferiores a los del presente estudio. En este sentido, Montenegro y Abarca (2001) reportaron valores de 50 y

31 g CH₄ kg leche⁻¹ para el hato doble propósito de Costa Rica durante los años 1990 y 1996, respectivamente. Mora (2001) obtuvo valores de 23,5 a 27,2 g CH₄ kg leche⁻¹ en fincas lecheras especializadas en Costa Rica. La mejor relación metano – producto se observó en fincas de alto nivel de uso de insumos.

Montenegro y Abarca (2002) en un estudio realizado en sistemas silvopastoriles en tres zonas de vida en Costa Rica, encontraron valores de 19, 22 y 31 g CH₄ kg leche⁻¹, correspondiendo los dos primeros a sistemas lecheros especializados en Bosque Montano Bajo y Bosque Premontano muy Húmedo, respectivamente, y el último a un sistema doble propósito en Bosque Seco Tropical.

En cuanto a la relación metano producido por unidad de peso vivo ganado por animales en crecimiento, se obtuvo valores en un ámbito entre 237 a 581 g CH₄ kg PV⁻¹ (Cuadro 43), correspondiendo los menores valores a animales en crecimiento temprano y los mayores a animales de mayor edad (hembras de 1-2 años y novillas). Lo cual, se relaciona con su estado fisiológico y la composición de la dieta. En el caso de los becerros pre-destete; además de amamantar, estaban en el proceso de desarrollo del rumen y recibieron una dieta de mayor valor nutritivo; en la cual, la leche contribuyó de manera importante, observándose un consumo promedio de 3,1±0,3 kg animal⁻¹ día⁻¹ (Cuadro 41).

Montenegro y Abarca (2001) reportaron valores de emisiones de 0,476 y 0,532 g CH₄ kg PV⁻¹ para hembras y machos en crecimiento del rebaño doble propósito de Costa Rica. Los valores obtenidos en el presente estudio para hembras de 1 a 2 años y novillas, guardan concordancia con los encontrados por estos autores.

Al integrar las emisiones de GEI en términos de CO₂e por animal, se obtuvieron valores promedio de 2,58 y 1,06 Mg CO₂e animal⁻¹ año⁻¹, para animales adultos y en crecimiento, respectivamente (Cuadro 43). Mora (2001) reportó emisiones de CO₂e de 3,21; 3,85 y 5,80 Mg CO₂e animal⁻¹ año⁻¹ en vacas lecheras en fincas de bajo, medio y alto nivel de uso de insumos en Costa Rica. Flessa et ál. (2002) para razas *Bos taurus* lecheras, reportaron

emisiones de 1,60 y 1,30 Mg CO₂e animal⁻¹ año⁻¹ en una finca con manejo convencional y una finca orgánica, respectivamente.

La emisión total anual de GEI del rebaño bovino se estimó en 100,7 Mg de CO₂e (Cuadro 44), de las cuales el 60% correspondió a las vacas (vacas lactantes + vacas secas), y se estimaron emisiones del 13, 11 y 12% para las novillas, hembras de 1 a 2 años y becerros, respectivamente. Mientras que, el toro contribuyó con el 2% del total de emisiones.

Los resultados obtenidos, estuvieron en concordancia con la composición del rebaño. Sin embargo, en el caso de los becerros, que conformaron el 32% de los animales del rebaño, las emisiones generadas representan sólo el 12% del total. Lo cual está asociado, como se indicó antes, a su estado fisiológico (animales en crecimiento y en proceso de desarrollo del rumen), menor peso corporal y consecuentemente a la calidad de la dieta suministrada.

Para uniformizar la comparación de las emisiones totales se estimó la producción de CO₂e por cada 1000 kg de peso vivo de los animales (Cuadro 44). Así, se obtuvo que los animales en etapa de crecimiento post-destete presentaron mayor nivel de emisiones que las vacas en producción. En el grupo de animales adultos, las vacas emitieron la mayor cantidad de CO₂e, lo cual se explica por sus mayores requerimientos nutricionales que conllevan a un mayor consumo de materia seca por día. En promedio, la emisión del rebaño estudiado se ubicó en 5,40 Mg de CO₂e 1000 kg PV⁻¹ año⁻¹ y se observó que el manejo alimenticio de los diferentes grupos de animales incidió directamente en las emisiones de GEI generadas por el rebaño.

Cuadro 44. Emisión total de tres gases de efecto invernadero procedentes de bovinos doble propósito del MF–ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.

Grupo etario	CO ₂ e (Mg año ⁻¹)			Total	CO ₂ e (Mg 1000 kg PV ⁻¹ año ⁻¹)
	Fermentación entérica	Manejo de las excretas			
	CH ₄	CH ₄	N ₂ O		
Vacas en producción	36,02	1,16	11,47	48,65	5,73
Vacas secas	8,34	0,23	3,74	12,28	4,34
Toro	2,00	0,06	0,89	2,94	3,75
Novillas	10,91	0,31	1,83	13,04	6,55
Hembras (1-2 años)	9,94	0,26	1,04	11,24	6,36
Terneros	11,06	0,30	1,18	12,54	4,52
Total	78,23	2,31	20,15	100,70	5,40

A partir de lo anterior, se determinó la necesidad de mejorar la calidad de la dieta suministrada a los animales, principalmente en las hembras en crecimiento post-destete y novillas. En todos los casos, se debe tener presente que a ninguno de los grupos etarios de la finca se ofreció alimento concentrado. Solo pasto como dieta base y fueron suplementados con los recursos generados en la finca. Los resultados obtenidos para las emisiones de GEI del rebaño mostraron que el aporte del metano procedente de la fermentación entérica, al total de emisiones, fue de 78%; mientras que el metano y óxido nítrico procedentes del manejo de las excretas fueron de 2% y 20%, respectivamente. En estudios realizados por Mora (2001), Casey y Holden (2005) y Kernebeek y Gerber (2008), obtuvieron que de las emisiones de GEI del ganado bovino, entre 82 a 89% y 11 a 18% correspondieron a emisiones producto de la fermentación entérica y al manejo de las excretas (CH₄ y N₂O), respectivamente.

Los resultados, evidencian la importancia de la fermentación entérica en su contribución a la emisión de GEI en sistemas ganaderos. De igual forma, se demuestra que las emisiones producto del sistema de manejo de las excretas deben ser consideradas para un balance de GEI, principalmente el N₂O por su alto potencial de calentamiento global. El conocimiento del comportamiento de las emisiones de GEI de los animales a escala de finca, puede aportar a reorientar las estrategias de manejo del rebaño y en general a establecer propuestas

tecnológicas de reducción de emisiones o economía de la emisión de GEI en sistemas ganaderos.

4.10.4.2 Simulación con el modelo *LIFE SIM*

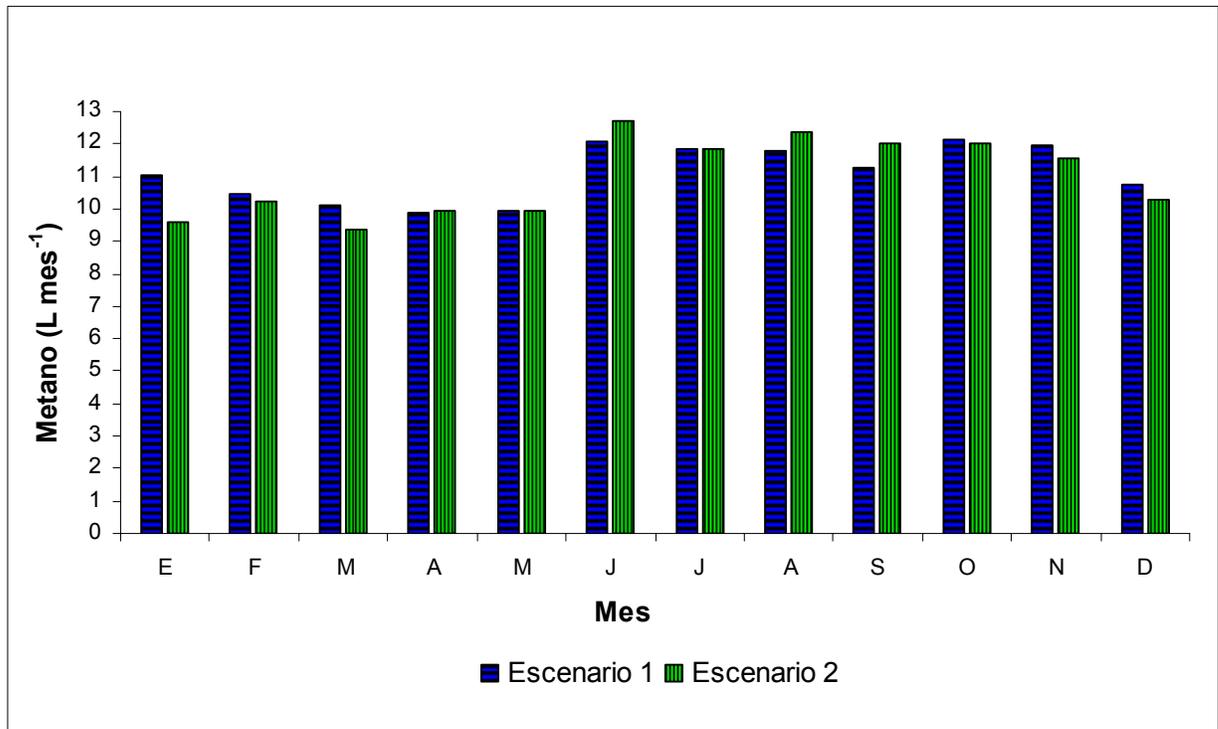
La simulación para un período de un año con el modelo *LIFE SIM* mostró que bajo los escenarios evaluados se observaron ligeras diferencias en cuanto al consumo de materia seca, la digestibilidad de la ingesta y la producción promedio diaria de CH₄ por época para vacas lactantes (Cuadro 45 y Figura 19). La diferencia observada en la producción de metano de origen entérico entre épocas fue de 15,2%. Es decir, que bajo las condiciones de la simulación e independientemente de la época de parto, las emisiones de metano fueron mayores en época lluviosa.

Cuadro 45. Parámetros obtenidos mediante simulación con el modelo *LIFE SIM* para vacas lactantes del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 2003-2005.

Época	Consumo (kg MS vaca ⁻¹ día ⁻¹)	Digestibilidad ^a (%)	Emisión de CH ₄	
			(L vaca ⁻¹ mes ⁻¹)	(g vaca ⁻¹ día ⁻¹)
Seca	10,64 ± 0,79	61,78	10,11± 0,40	238,23 ± 9,50
Lluviosa	11,23 ± 0,93	57,01	11,93± 0,36	280,94 ± 8,56

Donde: ^a Promedio ponderado estimado a partir de los valores de digestibilidad de los alimentos y composición de la dieta de acuerdo a la época del año.

Lo anterior, pudo ser debido a que aunque durante la época lluviosa, los forrajes (pastos, *G. sepium* y *L. leucocephala*), en promedio fueron 4,75% mas digestibles que en época seca. (Anexo 18) el silaje de yuca (hoja+raíz) ofrecido en época seca fue 32% más digestible que los silajes de caña de azúcar y sorgo suministrados en época lluviosa. En consecuencia, y visto en términos del consumo total de materia seca, durante la época seca se pudo presentar una mejora de la función ruminal debido a la suplementación con silaje de yuca; lo que favoreció un mejor balance de los productos finales de la digestión y por ende una menor producción de metano. En contraste, durante la época lluviosa, los silajes de caña de azúcar y sorgo limitaron la calidad de la dieta y contribuyeron a generar mayores emisiones de metano debido a la menor digestibilidad del sustrato.



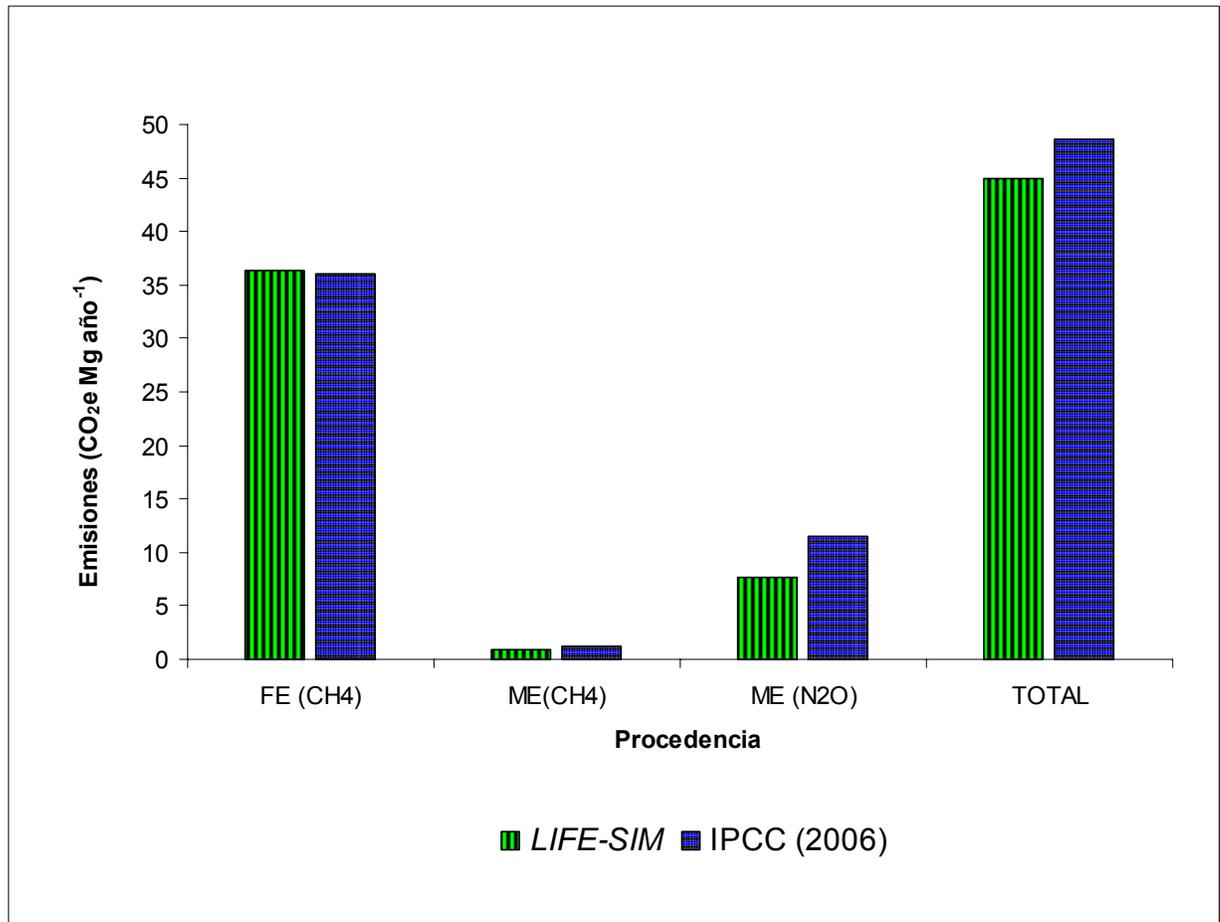
Donde: Escenario 1 = parto en época seca, Escenario 2 = parto en época lluviosa

Figura 19. Comportamiento anual de la producción de metano proveniente de la fermentación entérica en vacas doble propósito con parto en época seca y lluviosa.

Se evidenció el efecto de la composición de la dieta sobre las emisiones de metano de origen entérico en rumiantes. Factores como el consumo de alimento, tipo de carbohidratos de la dieta, valor nutritivo, entre otros, determinan la producción de metano a nivel ruminal (Johnson y Johnson 1995). Los rumiantes pierden 6% de la energía ingerida en forma de metano eructado (Johnson y Johnson 1995). Sin embargo, en condiciones tropicales estos valores se pueden incrementar, representando entre 10 y 20% (Escobar 1989).

La producción promedio diaria de metano procedente de la fermentación entérica para las vacas en producción fue de $259,58 \pm 23,30$ g vaca⁻¹ día⁻¹, resultado similar al obtenido al aplicar la metodología del IPCC (2006). Al comparar los resultados de las emisiones totales de CO₂e obtenidos con el modelo *LIFE SIM* y la metodología del IPCC (2006), se obtuvo una diferencia de 7,6%, a favor del procedimiento del IPCC (2006). Al comparar por tipo de gas y origen, se obtuvo que la diferencia más importante entre ambas metodologías se debió a la

emisión estimada de N₂O originado por el estiércol con un valor de 3,78 Mg CO₂ año⁻¹ (Figura 20).



Donde: FE = fermentación entérica y ME = manejo de las excretas.

Figura 20. Comparación de emisiones de dos gases de efecto invernadero estimadas por el modelo *LIFE SIM* y la metodología del IPCC.

Los resultados mostraron que el modelo *LIFE SIM* constituye una herramienta de amplia utilidad para simular las emisiones de metano en sistemas ganaderos. Además, permite analizar diferentes escenarios para el manejo del rebaño, generando indicadores bio-económicos que permiten la toma de decisiones ex-ante o durante el desarrollo de un proyecto.

4.10.4.3 Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del manejo del suelo

En las emisiones de directas de GEI procedentes del manejo del suelo se agruparon diferentes fuentes de GEI, entre ellas se incluyeron los fertilizantes nitrogenados, la aplicación de abonos orgánicos, la fijación biológica de N por los arbustos leguminosos (*L. leucocephala* y *G. sepium*) y la aplicación de residuos de cultivos al suelo; que además de la emisión de N₂O favorece la de CO₂. Los resultados expresados en términos de CO₂e se presentan en el Cuadro 46. La emisión de CO₂e por manejo del suelo por unidad de superficie dedicada a la producción ganadera fue de 1,28 Mg ha⁻¹ año⁻¹, valor inferior al estimado por van Kernebeek y Gerber (2008) para una finca lechera en India (13,42 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹).

Cuadro 46. Emisión total de dióxido de carbono equivalente procedente del manejo del suelo de los componentes asociados al subsistema bovinos doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

TUT	Superficie (ha)	CO ₂ e		%
		Mg año ⁻¹	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	
PCL	10,0	17,66	1,77	81
BF	1,1	1,71	1,56	8
CAZ	1,7	2,24	1,32	10
PAD	3,3	0,00	0,00	0
ROT	1,0	0,28	0,28	1
Total	17,1	21,90	1,28	100

Donde: PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar, PAD= pastura con árboles dispersos y ROT= rotación de cultivos.

El óxido nitroso se genera en forma natural en los suelos mediante los procesos microbianos de nitrificación y desnitrificación. Algunas actividades agrícolas aportan nitrógeno a los suelos, aumentando la cantidad disponible para la nitrificación y desnitrificación y, en definitiva, la cantidad de N₂O emitido (IPCC 2006).

Considerando la superficie total de la finca destinada al subsistema bovinos, se obtuvo que el TUT PCL presentó el mayor aporte de emisiones de GEI procedentes del manejo del suelo

con 81%; le siguieron los TUT CAZ y BF con 10 y 8% del total de emisiones, respectivamente (Cuadro 47). En el caso del TUT PAD, no se estimaron las emisiones producto del manejo del suelo y para el TUT ROT, las emisiones estimadas representaron el 1% del total de la finca.

En el caso de los TUT PCL y BF se tomó en cuenta que el manejo de los arbustos de *L. leucaena* y *G. sepium*, determinó que una fracción de la biomasa aérea generaron residuos cuando las plantas fueron sometidas a podas. De estos residuos (principalmente los tallos leñosos de las ramas), una fracción se incorpora al suelo como parte de la materia orgánica del suelo y el resto genera emisiones de CO₂ y N₂O.

Las mayores emisiones de GEI del TUT PCL se asocian con la aplicación de fertilizantes químicos y abonos orgánicos a la pastura, con 70 y 11% del total de las emisiones, respectivamente. Mientras que, las emisiones producto de la fijación biológica de N y de la descomposición de los residuos de la poda de *L. leucocephala* contribuyeron con 14 y 5%, respectivamente. En el TUT PCL los valores relativos de emisiones producto de la aplicación de fertilizantes aparentemente fueron altos; sin embargo, los valores absolutos fueron reducidos, ya que las cantidades de fertilizantes (químicos y orgánicos) aplicados en el subsistema fueron bajas, correspondiendo a 441 y 75 kg ha⁻¹ año⁻¹ de abono orgánico y urea, respectivamente.

En el TUT BF, el 53 y 47% de las emisiones se generaron por los residuos de la poda y la fijación biológica de N asociada a *G. sepium*. En este sistema no se aplicó ningún tipo de fertilizante, por lo que no se reportaron emisiones de esta fuente.

En el caso del manejo de la caña de azúcar (TUT CAZ) es importante considerar que las emisiones presentadas corresponden solo al 26% del total de emisiones del TUT, ya que el resto debe ser contabilizado en el subsistema cerdos. Las emisiones en este sistema se distribuyeron en 88, 11 y 1% para residuos de cultivo (hojarasca), fertilización química y fertilización orgánica, respectivamente. El alto valor relativo de las emisiones de GEI del cultivo de caña de azúcar se asoció con la producción de hojarasca observada en el cultivo

(20,69 Mg MS ha⁻¹)

Las emisiones estimadas para el TUT ROT procedentes del manejo del suelo para el período en evaluación fueron en su totalidad debidas al uso de fertilizantes. En este sistema los cultivos producidos son utilizados en forma integral para la elaboración de silaje para el consumo por los bovinos y no generó cantidades importantes de residuos para ser incorporados al suelo.

4.10.4.4 Emisiones de GEI procedentes del uso de combustibles fósiles

Las emisiones de CO₂e por el uso de combustibles fósiles se presentan en el Cuadro 47. Estas correspondieron a la utilización de tractor agrícola y desmalezadoras de tipo portátil. Los valores obtenidos (4,50 Mg año⁻¹ y 0,26 Mg ha⁻¹ año⁻¹) reflejaron un bajo índice de mecanización en el subsistema bovinos doble propósito. Como era de esperarse el gas de mayor impacto en las emisiones por consumo de combustibles fósiles fue el CO₂, con 99,90% de la emisión total de GEI.

Las estimaciones de consumo de combustibles, en unidades de energía fueron de 5,15 GJ ha⁻¹ año⁻¹, correspondiendo al consumo anual de 113; 17,72 y 1,29 L ha⁻¹ año⁻¹ de gas oil (diesel), gasolina y lubricantes, respectivamente. Las mayores emisiones de CO₂e correspondieron a los TUT ROT, PCL y CAZ con el 40, 22 y 21% del total de emisiones, respectivamente.

En cuanto a la procedencia de las emisiones por uso de combustible fósil, en los TUT PCL, CAZ, PAD y ROT se obtuvo que del 84 a 95% y 5 a 16% de las emisiones totales correspondieron al uso de tractor agrícola y desmalezadoras, respectivamente. Mientras que, en el TUT BF, todas las emisiones fueron producto del uso de desmalezadoras.

Cuadro 47. Emisiones de tres gases de efecto invernadero procedentes del uso de maquinaria y equipo agrícola de componentes asociados al subsistema bovinos doble propósito del MF–ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

TUT	Consumo combustible (GJ año ⁻¹)	Emisión (kg año ⁻¹)			CO ₂ e (Mg año ⁻¹)	CO ₂ e (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
PCL	12,32	902,27	0,07	3x10 ⁻⁴	0,99	0,10
BF	2,84	197,44	0,03	4x10 ⁻⁶	0,20	0,18
CAZ	11,40	842,06	0,05	3x10 ⁻⁴	0,94	0,55
PAD	6,71	491,55	0,04	2x10 ⁻⁴	0,54	0,16
ROT	22,32	1645,29	0,10	6x10 ⁻⁴	1,83	1,83
Total	88,06	6.475,23	0,28	13x10⁻³	4,50	0,26

Donde: 1 GJ = 10⁹ J. PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar, PAD= pastura con árboles dispersos y ROT= rotación de cultivos.

4.10.4.5 Emisión total de GEI del subsistema bovinos doble propósito

Al analizar la distribución de la tierra destinada a la ganadería (17,1 ha), se observó que los TUT PCL, PAD, CAZ, BF y ROT ocuparon el 59, 19, 10, 6 y 6% de la superficie total, respectivamente. En términos relativos y absolutos, la mayor proporción del área se destinó al pastoreo (78%), mientras que, el resto de las tierras se utilizaron para cultivos y bancos forrajeros.

Con respecto al total de emisiones, se observó que los mayores emisores fueron los TUT PCL y PAD, con el 55 y 17%, respectivamente. Mientras que, los TUT BF, CAZ y ROT emitieron el 28% restante. Los resultados obtenidos para los TUT PCL y PAD, fueron acordes a lo esperado, ya que estas fueron las áreas de pastoreo de los bovinos y proveen su dieta base (pastos); la cual, constituyó la mayor proporción del consumo estimado de materia seca de los animales. Además, se explican porque estos TUT (PCL y PAD) ocupan la mayor superficie de la finca. Por su parte, las emisiones de GEI estimadas para los TUT BF y CAZ fueron relativamente menores al resto de los TUT evaluados.

Cuadro 48. Emisiones anuales de CO₂e por fuente en el subsistema bovinos de doble propósito del MF–ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

TUT	CO ₂ e (Mg año ⁻¹)			Total	%	CO ₂ e (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
	Suelo	Combustible	Ganado			
PCL	17,66	0,99	51,83	70,48	55	7,05
BF	1,71	0,20	7,88	9,79	8	8,90
CAZ	2,24	0,94	4,25	7,43	6	4,37
PAD	0	0,54	21,50	22,04	17	6,68
ROT	0,28	1,83	15,23	17,34	14	17,34
Total	21,89	4,50	100,70	127,08	100	7,43

Donde: PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar, PAD= pastura con árboles dispersos y ROT= rotación de cultivos.

Al analizar las emisiones de GEI por unidad de área, los valores se ubicaron en un ámbito entre 4,37 y 17,34 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, correspondiendo la menor y mayor emisión a los TUT CAZ y ROT, respectivamente. El mayor nivel de emisiones alcanzado del TUT ROT se debió a que este uso de la tierra se dedicó a cultivos anuales, cuyos productos se procesaron exclusivamente para la suplementación del rebaño. El manejo más intensivo de estos suelos determina mayor emisión de GEI por unidad de área ocupada, que el resto de los TUT estudiados.

La emisión integrada de GEI de las fuentes consideradas (ganado, manejo del suelo y consumo de combustible) en el subsistema bovinos doble propósito fue de 127,08 Mg CO₂e año⁻¹ y por unidad de área fueron de 7,43 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 48). De acuerdo con las fuentes consideradas, se obtuvo que las emisiones de GEI por manejo del suelo, consumo de combustibles y el ganado fueron de 17, 4 y 79% del total de emisiones estimadas para la unidad de producción, respectivamente. Estos resultados muestran una alta proporción de emisiones procedentes de los animales y relativamente bajas de las otras dos fuentes (manejo del suelo y consumo de combustibles).

Estudios realizados a escala de finca en otras zonas de vida, muestran que la cantidad y distribución de las emisiones de GEI varían dependiendo del tipo de sistema de producción, raza de los animales y manejo de la finca. Sin embargo, en la mayoría de estos sistemas las emisiones de GEI generadas por el ganado y el suelo fueron las de mayor proporción.

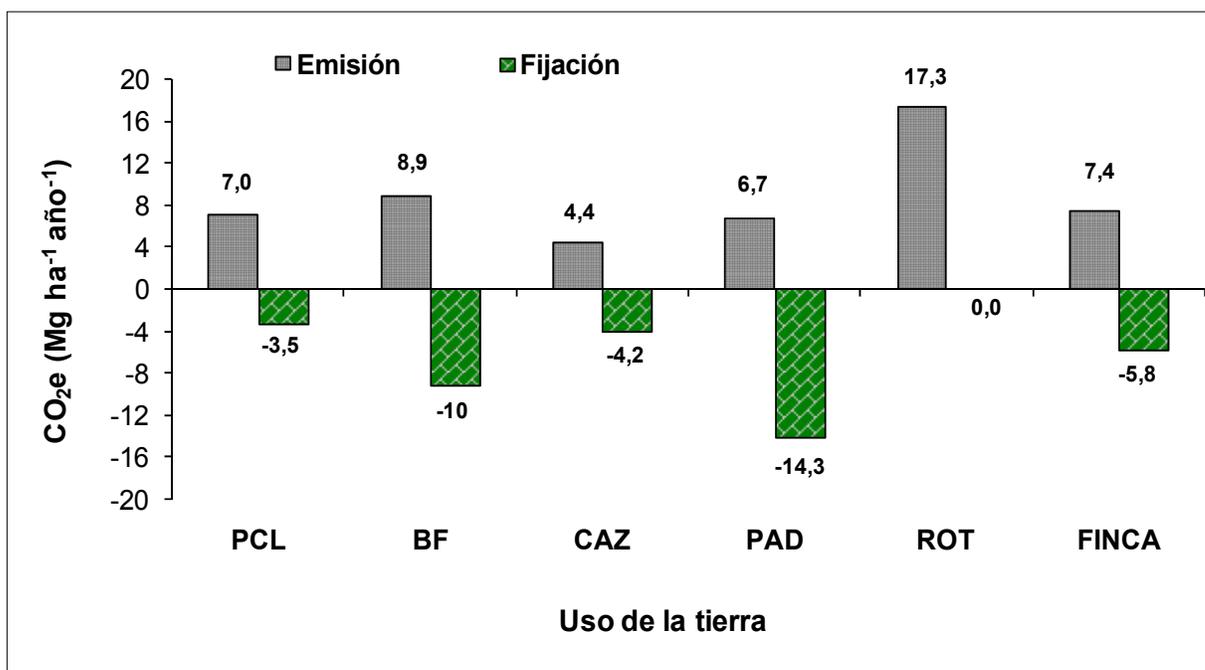
En Alemania, Flessa et ál. (2002) comparó dos fincas dedicadas a la producción de carne; una bajo manejo convencional y la otra bajo manejo orgánico. Las emisiones fueron de 6,13 y 6,00 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Las emisiones para ambas fincas se distribuyeron de manera similar, correspondiendo un 25, 57 y 18% al ganado, manejo del suelo y uso de combustible, respectivamente.

Casey y Holden (2005) estudiaron el sistema de producción de leche de Irlanda y encontraron que el 60, 21, 13 y 5% de las emisiones fueron causadas por el ganado, uso de fertilizantes, alimento concentrado y electricidad y combustible, respectivamente. En India, Kernebeek y Gerber (2008) en un finca lechera típica de la región de Ropar, obtuvieron emisiones de 72,6 Mg CO₂e año⁻¹ y 23,50 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, con el 40, 57 y 3% de las emisiones de GEI generadas por el ganado, manejo del suelo y consumo de combustible.

4.11 Balance general de gases de efecto invernadero

En este estudio el balance neto de GEI se concibió como la diferencia entre las remociones ocurridas en los sumideros y las emisiones generadas por las fuentes en un período de un año debido a la intervención antropogénica en los componentes bióticos y abióticos a escala de finca; representada por el subsistema bovinos de doble propósito del MF-ATS.

El balance neto de GEI generado a partir de las metodologías aplicadas para la estimación del carbono en el suelo (COS), arriba del suelo y en la modelación de las emisiones de las fuentes consideradas, demostró que en la finca se emitieron 7,43 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹ y se removieron 5,84 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹ durante el período evaluado (Figura 21). En consecuencia, el balance neto del subsistema bovinos doble propósito fue de 1,59 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹; lo cual, visto para la finca (subsistema bovinos doble propósito) equivale a 27,20 Mg CO₂e año⁻¹ (Cuadro 49). En términos prácticos, las remociones obtenidas en la finca fueron equivalentes a las emisiones estimadas para el ganado. Mientras que, en términos relativos se removió sólo el 79% de las emisiones generadas en el sistema ganadero.



Donde: PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar, PAD= pastura con árboles dispersos y ROT= rotación de cultivos.

Figura 21. Balance general de gases de efecto invernadero para el subsistema bovinos doble propósito del MF-ATS, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Desde el punto de vista metodológico, se presentó como limitante, que debido a que en el estudio de línea de base de suelos de la finca (UCV 1999), las variables densidad aparente y COS se evaluaron solo hasta 15 cm de profundidad, no fue posible estimar la variación del COS a mayor profundidad. Por lo tanto, no se consideró la remoción potencial del suelo hasta un metro de profundidad. No obstante, la metodología propuesta por el IPCC (1996) considera el almacenamiento de carbono en el suelo a mayor profundidad.

El contenido de COS de los TUT bajo estudio, desde 20 hasta 100 cm de profundidad estuvo en un ámbito de 37 a 56%, lo que demuestra la importancia de considerar la contribución del suelo al almacenamiento y fijación de carbono en todos los tipos de uso de la tierra evaluados. De igual manera, los resultados obtenidos de la fijación de carbono en el suelo sugieren que de haber considerado una mayor profundidad (> 15 cm), probablemente se

hubiesen reducido las diferencias entre remociones y emisiones de CO₂e, lo cual hubiese mejorado el balance de GEI de la finca.

Cuadro 49. Balance general de gases de efecto invernadero para el subsistema bovinos doble propósito del MF-ATS, Yaracuy, Venezuela. 2005.

TUT	Emisiones	Fijación CO ₂ e (Mg año ⁻¹)	Balance neto
PCL	70,48	35,22	-35,26
BF	9,79	10,29	0,50
CAZ	7,43	7,19	- 0,24
PAD	22,04	47,18	25,14
ROT	17,34	0,00	-17,34
Finca ^a	127,08	99,98	- 27,20

Donde: PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar, PAD= pastura con árboles dispersos y ROT= rotación de cultivos. ^a Superficie del MF-ATS destinada a ganadería bovina y equivale a 17,1 ha.

Agrupando los TUT evaluados, se observó que en el caso de los SSP el balance fue negativo para el TUT PCL. Sin embargo, en el TUT BF se obtuvo una diferencia mínima a favor de las remociones. Mientras que la pastura con árboles dispersos contribuyó con el balance de GEI, obteniéndose una remoción 47% mayor que las emisiones. Lo anterior, demuestra el potencial de remoción de GEI de las pasturas mejoradas con árboles dispersos en fincas ganaderas.

El TUT CAZ, que en términos prácticos constituye un banco de energía, tendió al equilibrio en su balance. Sin embargo, se debe tener presente que las emisiones del TUT CAZ sólo representaron la fracción correspondiente al componente bovino (26% del total de emisiones estimadas para el TUT CAZ). Esta información podría ser complementada realizando el balance de GEI en el subsistema cerdos. Para el TUT ROT el balance fue positivo, es decir, emitió GEI. Sin embargo, fue importante su inclusión en el análisis, ya que en cierto modo permitió cuantificar las emisiones que pudieran generarse por la producción de un alimento concentrado, si este se hubiese adquirido en el mercado, y deben ser consideradas en un balance de GEI a nivel de finca.

Los resultados obtenidos para el balance de GEI contrastan y en algunos casos concuerdan con los reportados por otros autores (Mora 2001, Montenegro y Abarca 2002, Cuartas et ál. 2008) en diferentes zonas de vida de América Tropical. En este sentido, Mora (2001) en una zona de Bosque Húmedo Montano Bajo de Costa Rica, evaluando fincas lecheras especializadas obtuvo balances netos de 12,61; 4,69 y -1,98 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹ para sistemas de bajo, medio y alto uso de insumos, respectivamente. El balance fue positivo para las dos fincas que contaron con árboles en potreros (100 y 63 árboles ha⁻¹, respectivamente); mientras que, en la finca con alto uso de insumos y sin árboles en potrero, el balance fue negativo.

Montenegro y Abarca (2002) en SSP ubicados en zonas de Bosque Montano Bajo, Bosque Premontano muy Húmedo y Bosque Húmedo Tropical, obtuvieron balances de -8,87; -14,34 y -1,53 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. En otro estudio, efectuado por Cuartas et ál. (2008) en un SSP intensivo de *L. leucocephala* en una zona de Bosque Seco Tropical en Colombia, obtuvieron un balance de 10,1 Mg CO₂e ha⁻¹ año⁻¹.

Bajo las condiciones de desarrollo del estudio, los resultados mostraron que el soporte de las remociones a escala de finca se sustentó principalmente en los TUT que involucraron la presencia de árboles, destacando entre ellos la pastura de *P. maximum* con árboles dispersos (PAD) y el banco forrajero de *G. sepium* (BF). De igual manera, se destacó el hecho de que en todos los TUT el suelo contribuyó a la fijación de carbono.

A nivel mundial, los sistemas ganaderos han sido considerados como responsables parciales de las emisiones de GEI que contribuyen al cambio climático. Sin embargo, los SSP presentan un alto potencial para la mitigación de las emisiones de GEI; por lo que son una opción tecnológica a considerar para el desarrollo de sistemas sostenibles de producción agropecuaria, representando una importante estrategia de ganar – ganar para el ganadero y la conservación del ambiente.

4.12 Reflexiones metodológicas

Durante el desarrollo de esta investigación hubo una serie de elementos metodológicos que fueron determinantes para la generación de los resultados obtenidos. En esta sección se exponen éstos, ya que podrían ser tomados en cuenta para la ejecución de estudios similares.

a. Variabilidad de las características de los suelos bajo estudio

El presente estudio, desarrollado a escala de finca, evidenció una alta variabilidad en las condiciones de los suelos del área. Bajo este punto de vista, se justificó el muestreo estratificado y el número de repeticiones aplicadas. Además, la variabilidad de los suelos fue determinante para que no se realizaran comparaciones estadísticas de los resultados obtenidos para el COS en los diferentes TUT. En su defecto, se recurrió a técnicas de análisis multivariado para explicar la variabilidad de las variables originales del suelo.

Los resultados obtenidos sugieren que factores como origen del suelo (procesos formadores), historia de manejo, uso y manejo actual influyeron en el comportamiento del COS. Sin embargo, el nivel de detalle del estudio no permitió diferenciar el efecto de estos factores. Lo anterior, resalta con la opinión de Moreno y Lara (2003), quienes señalan que el suelo es un cuerpo natural más dinámico e inestable de lo que parece y por lo tanto se justifica la investigación continua de sus procesos, con la finalidad de comprender mejor su papel en el ciclo del carbono.

b. Disponibilidad de datos de la línea base de suelos

Fue de gran importancia contar con el estudio de línea base de suelos del MF-ATS (UCV 1999). Sin embargo, no disponer de los datos de densidad aparente y contenido de COS a una profundidad mayor a 15 cm en ese estudio, limitó los cálculos para la estimación de la fijación de COS y en consecuencia incidió en los resultados del balance de GEI en el subsistema bovinos doble propósito.

c. Emisiones de metano y oxido nitroso por rumiantes

Las emisiones de GEI procedentes de los bovinos y estimadas a través de los métodos aplicados en este estudio son producto de una modelación basada en la información de campo recabada y supuestos asumidos. Por lo tanto, son una aproximación a la realidad y deben ser considerados como tales; ya que factores como la raza del animal, estado fisiológico, estado de salud, calidad y procesamiento del alimento, manejo alimenticio y condiciones ambientales, entre otros; inciden en los procesos digestivos y determinan el balance de sus productos finales. Aunado a lo anterior, los modelos aplicados utilizan ecuaciones que han sido generadas, en la mayoría de los casos, para grupos raciales en condiciones de manejo similares en zonas de clima templado.

d. Resultados del balance de gases de efecto invernadero

Bajo las metodologías de ejecución del estudio se evidenció que el balance de GEI para el subsistema bovinos doble propósito fue positivo, es decir hubo emisiones de GEI. Sin embargo, en el MF-ATS se desarrollaron otros componentes (no evaluados en este estudio) que han incorporando el componente arbóreo con buenas prácticas de manejo agrícola. Las cuales, se estima han contribuido al secuestro de carbono y consecuentemente mejoran el balance de GEI. Entre estos componentes se destacan: - sistema silvopastoril multiestrata (4,4 ha, en establecimiento al momento de ejecución de la fase de campo), siembras lineales de palmas (*A. aculeata*, *E. guineensis*, *B. gasipaes*), lindero con árboles maderables (aproximadamente un segmento de 0,8 km con teca *Tectona grandis*, pardillo *Cordia thaisiana* y apamate *Tabebuia rosea*) y segmentos de cercas vivas con dominancia de *G. sepium*.

5 CONCLUSIONES

El carbono total arriba del suelo varió entre sistemas analizados, lo que denota la influencia del uso de la tierra sobre esta variable. En este sentido, el mayor almacenamiento correspondió al TUT BP; mientras que en los sistemas con intervención antropógena, las mayores cantidades se observaron en los TUT PAD y CAZ, y fueron menores en los TUT BF y PCL. Lo anterior, evidencia el potencial de las pasturas mejoradas con árboles dispersos en el almacenamiento de carbono en sistemas ganaderos.

El COS, hasta un metro de profundidad equivalente, varió entre TUT; correspondiendo la mayor cantidad a BP y PAD; los valores observados para BF y PCL fueron menores y similares entre sí, mientras que en CAZ se obtuvo el menor contenido.

Las menores tasas de disminución del COS en función de la profundidad se observaron en los TUT BP y PCL, seguidos de PAD y BF, mientras que fue mayor en el TUT CAZ.

El análisis multivariado evidenció que el comportamiento del COS no pudo ser explicado por el tipo de uso de la tierra. Se considera que existen otros factores asociados, tales como origen, historia de uso y manejo actual que influyen sobre esta variable.

El carbono total por sistema fue mayor en el TUT BP, mientras que en los TUT PCL, BF y CAZ representó aproximadamente un cuarto del almacenado en el BP; en contraste, el carbono total almacenado en PAD representó cerca de la mitad del almacenado en el BP.

Las emisiones de GEI (CH_4 y N_2O) procedentes de la fermentación entérica y manejo de las excretas de los rumiantes variaron entre grupos de animales de acuerdo a su estado fisiológico y composición de la dieta. Estas emisiones fueron mayores en los animales de altos requerimientos nutricionales, tales como vacas en producción y novillas.

A nivel del subsistema de ganadería de doble propósito estudiado las emisiones de CO_2e

fueron de 127 Mg año^{-1} , lo cual equivale a una emisión de $7,4 \text{ Mg CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, de éstas el 79%, 17% y 4% fueron generadas por el ganado, el manejo del suelo y el consumo de combustibles fósiles, respectivamente.

El balance general de GEI demostró que para el periodo en evaluación las emisiones de CO_2e superaron la fijación del sistema de producción de bovinos de doble propósito en $1,59 \text{ Mg de CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

El balance general de GEI estuvo influenciado por la distribución y manejo de los TUT en el sistema de producción ganadero. En este sentido, los TUT PAD y BF mostraron un balance neto positivo, lo que demuestra la importancia de los sistemas silvopastoriles en su contribución a la remoción de carbono de la atmósfera.

A nivel del sistema de producción, además de estimar el almacenamiento de carbono, fue importante establecer el balance de GEI, de manera de comparar las emisiones con la remoción, lo que permitirá analizar los factores de mayor impacto en el proceso y contribuirá con la toma de decisiones para la gestión de la finca.

6 RECOMENDACIONES

A partir de los resultados del presente estudio, se generaron diferentes recomendaciones, algunas de aplicabilidad a nivel de finca y otras enfocadas hacia la investigación y el desarrollo de proyectos relacionados con PSA:

6.1 A nivel de finca

A nivel del MF-ATS se recomienda considerar la aplicación de prácticas de manejo de la finca que contribuyan a reducir y remover las emisiones de GEI procedentes del ganado.

Entre ellas:

- a. Optimizar el manejo y utilización de las pasturas reduciendo el tiempo de ocupación y en consecuencia el período de descanso de los potreros, de manera de aprovechar los recursos forrajeros (principalmente pastos) cuando presentan su mayor valor nutritivo.
- b. Analizar los factores de manejo agronómico de los cultivos y procesamiento post-cosecha que puedan estar influyendo en la calidad de los silajes elaborados para la suplementación de los animales.
- c. Mejorar la suplementación alimenticia de los animales desde la fase de crecimiento post-destete hasta novillas de reemplazo. La disponibilidad de recursos forrajeros como *L. leucocephala*, *G. sepium*, *T. gigantea*, *Morus* spp., caña de azúcar y pastos; cultivos complementarios como *S. vulgare*, *M. esculenta*, *C. ensiformis*; palmas aceiteras y diferentes especies de árboles forrajeros, brindan la posibilidad de establecer diferentes estrategias de manejo alimenticio a lo largo del año que podrían contribuir a mejorar la respuesta animal y reducir las emisiones de GEI en la finca.
- d. Aplicar técnicas de suplementación alimenticia orientadas a optimizar la función ruminal, solventar las deficiencias de nutrientes esenciales y mejorar el balance de los productos finales de la digestión; de manera de obtener mayor eficiencia en el uso de la energía y proteína aportados por los alimentos.
- e. Mejorar la eficiencia reproductiva del rebaño mediante la selección de animales según los registros productivos y reproductivos; eficiencia genética, sanidad y manejo de registros; de manera de mantener la productividad del hato con una menor carga animal y avanzar en la búsqueda del óptimo ecológico y económico del sistema.
- f. Considerar en el diseño de la finca la incorporación de componentes que contribuyan a la remoción de las emisiones de GEI. Entre ellas: establecer árboles multipropósito

(sombra, forraje, fruta, semilla, leña, madera, entre otros) en las áreas de pastoreo (p. ej. en el TUT PCL), incrementar los segmentos de cercas vivas y linderos con especies maderables y palmas productoras de frutos para el consumo animal; además, de áreas en barbecho para la regeneración natural.

- g. Incorporar un biodigestor para el manejo y aprovechamiento de las excretas y aguas residuales generadas en los corrales y sala de ordeño de la finca.
- h. Considerar la sustitución de maquinaria y equipos agrícolas en labores como transporte, labranza y control de malezas, mediante la incorporación de tracción animal y la aplicación de prácticas de labranza reducida.

6.2 Investigación, difusión y proyectos de pagos por servicios ambientales

En el área de la investigación y desarrollo de proyectos con componentes de PSA se recomienda:

- a. Evaluar la dinámica y aporte de las raíces y la hojarasca de las diferentes especies (gramíneas y árboles) en el almacenamiento y flujo de carbono en el suelo de los TUT estudiados.
- b. Estudiar el impacto del manejo aplicado en la finca sobre la conservación de la biodiversidad y el agua.
- c. A nivel local, nacional y regional es imprescindible continuar promoviendo la implementación de proyectos participativos que estimulen el desarrollo de sistemas integrados de producción agropecuaria; que incorporen sistemas silvopastoriles y otras tecnologías que contribuyan a reducir el impacto ambiental negativo generado por las actividades agrícolas. En consecuencia, es fundamental impulsar procesos de capacitación de los productores y técnicos en torno a la importancia del balance de GEI en sistemas agropecuarios. Además, de la difusión de la información para socializar sobre la necesidad de la valoración y pago por los servicios ambientales generados en sistemas agrícolas manejados bajo criterios de sostenibilidad.
- d. En la implementación de proyectos de pagos por servicios ambientales en sistemas agropecuarios, se sugiere considerar el balance de GEI de las fincas, de manera de contribuir a reducir de manera efectiva las emisiones y de esta forma avanzar hacia la construcción y consolidación de sistemas sostenibles de producción agropecuaria.
- e. Difundir la información generada en este estudio.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, J de; Lima, M; Queiroz, M. de; Santos, M; Primavesi, O; Toyoko; R; Berchielli, T. 2004. Inventory improvements for methane emissions from ruminants in Brazil. Report No. 8. Jaguariúna, SP, Br, Brazilian Agricultural Research Corporation- Embrapa. 15 p.
- Albrecht, A; Kandji, S. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99:15-27.
- Amézquita, M. 2002. Project objectives, expected products and research methodology. In International Coordination Meeting of the Project (3th, 2002, Turrialba) 2002. Project "Research network for the evaluation of carbon sequestration capacity of pasture, agropastoral and silvopastoral systems in the American tropical forest ecosystem". Carbon sequestration and farm income: concepts and methodology. Comps. MC. Amézquita; F. Ruiz; B. van Putten. CIPAV/U. Amazonía/CIAT/CATIE/Wageningen University. p. 25-48. (Internal Document No. 5).
- Amézquita, M; Amézquita, E; Casasola, F; Ramírez, B; Giraldo, H; Gómez, M; Llanderal, T; Velásquez, J; Ibrahim, M. 2008. C stocks and sequestration. In L.'t Mannelje; M.C. Amézquita; P. Buurmann; M. A. Ibrahim. Eds. Carbon sequestration in tropical grassland ecosystems. Wageningen, NL, Wageningen Academic Press Publishers. 221 p.
- Andrade, H. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con Acacia Mangium y Eucalyptus deglupta en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 70 p.
- Andrade, H; Ibrahim, M. 2004. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Americas* 10(39-40):109-116.
- Andrade, H; Brook, R; Ibrahim, M. 2008 Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant Soil* 308 (1-2):11-22.
- Añez, F. 2007. Caracterización de la producción de un rebaño bovino doble propósito en el Modelo de Granja Integral Sostenible "Águiles Escobar Boves", Municipio San Felipe, estado Yaracuy. Tesis Ing. Agr. Maracay, VE, FAGRO-UCV. 202 p.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemist) 1990. Official Methods of Analysis. 15 ed, Arlington, USA, AOAC.
- Apps, J.M. 2003. Forest, the global carbon cycle and climate change (en línea). In XII World

- Forestry Congress (2003, Québec, CA). Invited Paper. Consultado 15 jun. 2008. Disponible en <http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/MS14-S.HTM>
- Arias, A; Alonso, C; Rodríguez, G; Kries, R. 1997. Marco global para el desarrollo agropecuario: el caso Venezuela. In II Foro Iberoamericano de Agricultura. Maturín, VE, Ministerio de Agricultura y Cría. 55 p.
- Arias, K; Ruiz-Sivera, C; Milla, M; Messa, H.F; Escobar, A. 2001. Almacenamiento de carbono por *Gliricidia sepium* en sistemas agroforestales de Yaracuy, Venezuela. (en línea). Livestock Research For Rural Development 13(5). Consultado 1 Nov. 2006. Disponible en: <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd13/5/ruiz135.htm>
- Bhatia, A; Pathak, H; Aggarwal, P. 2004. Inventory of methane and nitrous oxide emissions from agricultural soils of India and their global warming potential. Current Science 87(3): 317-324
- Bevilacqua, M; Miranda, M. 2002. Cobertura y protección de los bosques. In Situación de los bosques en Venezuela. La región Guayana como caso de estudio. Informe del Observatorio Mundial de Bosques Observatorio Mundial de Bosques (OMB - Venezuela). Instituto de Recursos Mundiales (WRI) - Fundación Polar. Caracas, VE, ImagenColor S.A. 133 p.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer FAO Forestry Paper 134. Roma, IT. 55 p.
- Brown, S; Gillespie, A; Lugo, A. E. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. Forestal Science 35:881-902.
- Brown, S; Lugo, A. E. 1984. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. Science 223: 1290-1293.
- Buurman, P; Ibrahim, M; Amézquita, MC. 2004. Mitigation of greenhouse gas emissions by silvopastoral systems: optimism and facts. In 2nd. Intl. Congress in Agroforestry Systems, Mérida, MX, Febrero 2004.
- Buurman, P; Amézquita, M; Ramírez, H. 2008. Factors affecting soil C stocks: a multivariate analysis approach. In L.'t Mannetje; M.C. Amézquita; P. Buurmann; M. A. Ibrahim. Eds. Carbon sequestration in tropical grassland ecosystems. Wageningen, NL, Wageningen Academic Press Publishers. 221 p.
- Camacaro, S; Garrido, J; Machado, M. 2004. Fijación de nitrógeno por *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium* y *Albizia lebbek* y su transferencia a las gramíneas asociadas. Zootecnia Tropical 22(1):49-69.
- Camargo, M. 2001. Composición botánica forrajera y productividad lechera en fincas de

- doble propósito del Municipio Guanarito, Edo. Portuguesa. Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología, Volumen Especial: 102-109.
- Camero, A. 1995. Desarrollo de sistemas silvopastoriles y sus perspectivas en la producción de carne y leche en el trópico. In *Silvopastoreo: alternativas para mejorar la estabilidad y competitividad de la ganadería colombiana*. Bogotá, CO, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural / Corpoica. p 13-32.
- Casey, J; Holden, N. 2005. Analysis of greenhouse gas emissions from the average Irish milk production system. *Agricultural Systems* 86:97-114.
- Chacón, M; Harvey, C; Delgado, D. Diversidad arbórea y almacenamiento de carbono en un paisaje fragmentado del bosque húmedo de la Zona Atlántica de Costa Rica. 2007 *Recursos Naturales y Ambiente* 51-52:19-32.
- Chave, J; Andalo, C; Brown, S; Cairns, MA; Chambers, JQ; Eamus, D; Fölster, H; Fromard, F; Higuchi, N; Kira, T; Lescure, JP; Nelson, BW; Ogawa, H; Puig, H; Riéra, B; Yamakura, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecología* 145:87-99.
- Comerma, J; Paredes, R. 1978. Principales limitaciones y potencial de las tierras en Venezuela. *Agronomía Tropical* 28(2):71-85.
- Cuartas, C; Naranjo, J; Barahona, R; Murgueitio, E. 2008. Aproximación al balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos de leucaena con pastos mejorados. In *V Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible (2008, Maracay, VEN) Memorias*. Eds. F. Espinoza; P. Argenti; N. Obispo; J. Gil. Maracay, VEN, INIA/AVPA. p. 13.
- Dalal, R; Wang, W; Robertson, P; Parton, W. 2003. Nitrous oxide emission from Australian agricultural lands and mitigation options: a review. *Australian Journal of Soil Research* 41:165-195.
- Dávila, R. 2005. *Administración y Planificación de Maquinaria Agrícola*. Caracas, VE, UCV-CDCH. 234 p.
- Delaney, M; Brown, S; Lugo, A; Torres-Lezama, A; Bello Quintero, N. 1997. The distribution of organic carbon in major components of forest located in five live zones of Venezuela. *Journal of Tropical Ecology* 13:697-708.
- Development Core Team R, 2007. *A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Consultado 15 de jun. de 2007. Disponible en: <http://www.R-project.org>.
- Dixon, R. 1995a. Sistemas agroforestales y efecto invernadero. *Agroforestería en las*

- Américas 2(7):22-26.
- Dixon, R. 1995b. Agroforestry systems: sources or links of greenhouse gases? *Agroforestry Systems* 31:99-116.
- Ellert, B; Janzen, H; Entz, T. 2002. Assessment of a method to measure temporal change in soil carbon storage. *Soil Science Soc. American Journal* 66:1687-1695.
- Escobar, A. 1989. Principios y estrategias para la suplementación alimenticia de los rumiantes. Seminario Postgrado en Producción Animal. Maracay, VE, FAGRO-FCV UCV. 63 p.
- Escobar, A. 1998. Los árboles forrajeros en los sistemas silvopastoriles. In IV Seminario sobre Manejo y Utilización de Pastos y Forrajes. R. Tejos, C. Zambrano, L. Mancilla, W. García y M. Camargo. Eds. Barinas, VE, UNELLEZ – Barinas. pp. 1-14.
- Escobar, A; Messa, H.F; Ruiz-Silvera, C; Rodríguez, J. 2000. Proyecto de establecimiento y evaluación de un modelo físico de agricultura tropical sostenible. In Taller Internacional Agricultura Tropical Sostenible: experiencias y desafíos para el tercer milenio (1998, San Javier, VEN). Memorias. Caracas, VEN, Fundación Polar / Fundación Danac / CIARA. p. 65-72.
- Ewel, J; Madriz, A. y Tosi, J. 1976. Zonas de vida de Venezuela. Segunda Edición. Caracas, VE, FONAIAP - Ministerio de Agricultura y Cría. p. 265.
- Falkowski, P; Scholes, R; Boyle, E; Canadell, J; Canfield, D; Elser, J; Gruber, N; Hibbard, K; Hogberg, P; Linder, S; Mackenzie, F; Moore III, B; Pedersen, T; Rosenthal, Y; Seitzinger, S; Smetacek, V; Steffen, W. 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science* 290:291-296.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2000. Sistemas de uso de la tierra en los trópicos húmedos y la emisión y secuestro de CO₂. Informes sobre recursos mundiales de suelos 88. Roma, IT, FAO. p. 120
- Ferreira, CM. 2001. Almacenamiento de carbono en bosques secundarios en el Municipio de San Carlos, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 100 p.
- Fischer, MJ; Trujillo, W. 1999. Fijación de carbono en pastos tropicales en sabanas de suelos ácidos neotropicales. In C. Pomareda y H. Steinfeld. Eds. Intensificación de la ganadería en Centroamérica: Beneficios económicos y ambientales. CATIE/FAO/SIDE, San José, CR, pp. 115-135.
- Flessa, H; Ruser, R; Dorsch, P; Kamp, T; Jiménez, M; Munch, J; Beese, F. 2002, Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 91:175-189.

- Fraute, N. 2001. Caracterización de un horizonte con características de fragipán y distribución espacial de su profundidad y espesor en un suelo bajo la asociación pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) – mata ratón (*Gliricidia sepium*), del modelo físico de agricultura tropical sostenible – Fundación Polar. Tesis Ing. Agr. Maracay, VE, FAGRO-UCV. 82 p.
- Fundación Danac (Fundación para la investigación agrícola Danac). 2006. Climatología agrícola, base de datos estación Agroclimatológica Naranjal (en línea). Consultado 15 abr. 2006. Disponible en http://danac.org.ve/organizacion/org_apoyo.php?id_unidad=18
- Fundación GDP (Fundación para el Desarrollo de la Ganadería de Doble Propósito). 2002. La ganadería bovina de doble propósito. In González-Stagnaro, C; Soto Belloso, E; Ramírez, L. eds. Avances en la ganadería de doble propósito. Maracaibo, VE, Astro Data S.A. p. 1-8.
- Gilbert de Brito, J; López, I; Pérez, R. 1990. Manual de métodos y procedimientos de referencia (análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad). Maracay, VE, FONAIAP-CENIAP. 164 p. (Serie D N° 26).
- Goering, H; Van Soest, PJ. 1970. Forage fiber analyses. Agricultural Handbook. Washington DC, USA, Government Printing Office. 379 p.
- Gordon, A; Narres, V; Thevathasan, R. 2004. In MR Mosqueda-Losada; J McAdam; a Rigueir- Rodríguez Eds. Silvopastorismo y Manejo Sostenible. Congreso Internacional (abril 2004, Lugo, ES). Actas. Pp. 114.
- Herrera, M; Valle, J. del; Orrego, S. 2003. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques primarios intervenidos y secundarios. In Orrego, SA; Valle JI del; Moreno, FH. eds. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia, contribuciones para la mitigación del cambio climático. Bogotá, CO. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ciencias Forestales / Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente (CAEMA). p 145-167.
- Holdridge, L. 2000. Ecología basada en zonas de vida. 5ª Reimpresión. San José, CR. IICA. 216 p.
- Houghton, R. 2003. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology* 9(4):500-509.
- Hüber, O. 1997. Ambientes fitogeográficos de Venezuela. Serie Catálogo Zoológico de Venezuela v. 297, 298. Caracas, VE, Lamaraca.

- Ibrahim, M; Chacón, M; Cuartas, C; Naranjo, J; Ponce, G; Vega, P; Casasola, F; Rojas, J. 2007. Almacenamiento de carbono en el suelo y la biomasa arbórea en sistemas de usos de la tierra en paisajes ganaderos de Colombia, Costa Rica y Nicaragua. *Agroforestería en las Américas* 45:27-36.
- InfoStat. 2004. InfoStat, versión 2004. Manual del Usuario. Córdoba, Ar, Grupo InfoStat, FCA Universidad Nacional de Córdoba, Edit. Brujas. 2 ed. 318 p.
- InfoStat (2006) Infostat / Profesional versión 2006 p2. Córdoba, Ar, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- 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.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001a. Technical summary. In *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I of the Intergovernmental panel on climate change*. Consultado nov. 2005. Disponible en: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001b. *Climate change: Mitigation. Contribution of working group III of the Intergovernmental panel on climate change*. (en línea). Consultado nov. 2005. Disponible en: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg3/index.htm.
- IPCC (Intergovernmental Panel Climate Change). 2006. *Guidelines for National Green House Inventories*. (en línea). Consultado abr 2007. Disponible en: <http://www.grida.no/climate/ipcc>
- Johnson, K; Johnson, D. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal Animal Science* 73: 2483-2492.
- Kanninen, M. 2000. Secuestro de carbono en los bosques: El papel de los bosques en el ciclo global de carbono. In C. Pomareda y H. Steinfeld Eds. *Intensificación de la ganadería en Centroamérica: Beneficios económicos y ambientales*. CATIE/FAO/SIDE, San José, CR, pp. 137-149.
- Kempton, T. 1980. El uso de bolsas de nylon para caracterizar el potencial de degradabilidad de alimentos para el rumiante. *Producción Animal Tropical* 5:115-126.
- Kernebeek, H van; Gerber, P. 2008. Environmental life cycle analysis of milk production in Ropar, India. Steps towards a simplified and robust model to evaluate environmental impacts associated with the delivery of animal products. Roma, IT, FAO. 34 p.

- Ketterings, Q; Coe, R; Noordwijk, M van; Ambagau, Y; Palm, CA. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forest. *Forest Ecology and Management* 146:199-209.
- Kursten, E; Burschel, P. 1993. CO₂ mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution* 70:533-544.
- Lal, R. 2001. Soils and the greenhouse effect. In R. Lal. ed. *Soils Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect*. Madison, USA, Soil Science Society of America, Inc. 236 p.
- Lascano, C; Avila, P; Ramírez, G; Amezquita, M. 1997. Fuentes de variación en la producción y composición de la leche en un sistema de pastoreo secuencial. In C. Lascano; F. Holmann. eds. *Conceptos y metodologías de investigación en fincas con sistemas de producción de doble propósito*. Cali, CO, CIAT-Consorcio Tropicoleche. 285 p.
- León-Velarde, C; Quiroz, R. A; Cañas, R; Osorio, J; Guerrero, J; Pezo, D. 2006. LIFE-SIM: *Livestock feeding strategies simulation models*. Natural Resources Management Division, CIP (International Potato Center), Lima, PE (Working Paper N° 2006-1). 37 p.
- López, A; Schlönvoigt; Ibrahim, M; Kleinn, C; Kanninen, M. 1999. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en el Zona Atlántica de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 6(23):51-53.
- Louman, B. 2002. Inventarios en bosques secundarios – Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. L. Orozco; C. Brumer. eds. Turrialba, CR, CATIE. 264 p.
- MAC (MINISTERIO DE AGRICULTURA Y CRÍA). 1998. Anuario Estadístico Agropecuario. Caracas, VE, MAC.
- MacDiken, K. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, USA, Winrock International. 87 p.
- MARN-PNUD-GEF (Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Fondo Mundial para el Medio Ambiente). 2005. Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Venezuela. Caracas, VE, MARN. 141 p.
- Mardquardt, D. W. 1970. Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation. *Technometrics* 12(3):591-612.
- Martínez, G; Vaccaro, L. 1996. Pesos y mediciones corporales de bovinos jóvenes y adultos en rebaños de doble propósito. In D. Plasse, N. Peña de Borsotti; R. Romero. Eds. XII

- Cursillo sobre Bovinos de Carne. Maracay, VE, Fac. Cs. Vetrinarias UCV. pp. 185-208.
- Mata, R. 2003. Principios generales sobre pedología de suelos. Puntarenas, CR. Mimeo. 108 p.
- Montagnini, F. 1992. Sistemas agroforestales, principios y aplicaciones en los trópicos. 2ª. Ed. San José, CR, Organización para Estudios Tropicales. p. 88-93.
- Montagnini, F; Nair, PK. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61:281-295
- Montenegro, J; Abarca, S. 2001a. Balance of emissions with greenhouse effect in silvopastoral systems in three life zones of Costa Rica. In Ibrahim, M. compiler. International Symposium on Silvopastoral Systems, Congress on Agroforestry and Livestock Production in Latin America. (2, 2001, San José, CR). Turrialba, CR, CATIE/GTZ/EDI/IFS/DANIDA/IUFRO/SIDCA /FAO. p. 107-111
- Montenegro, J; Abarca, S. 2001b. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. San José, CR, Ministerio de Agricultura y Ganadería / Instituto Meteorológico Nacional. 135 p.
- Montenegro, J; Abarca, S. 2002. Los sistemas silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones. *Agronomía Costarricense* 26(1):17-24.
- Mora, V. 2001. Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas en monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 92 p.
- Moreno, F; Lara, W. 2003. Variación del carbono orgánico del suelo en bosques primarios intervenidos y secundarios. In Orrego, SA; Del Valle JI; Moreno, FH. eds. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia, contribuciones para la mitigación del cambio climático. Bogotá, CO. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ciencias Forestales / Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente (CAEMA). p 87-120.
- Murgueitio, E; Rosales, M.; Gómez; M. 1999. Agroforestería para la producción animal sostenible. Cali, CO, Fundación CIPAV. 67 p.
- Murgueitio, E; Ibrahim, M; Ramírez, E; Zapata, A; Mejía, C; Casasola, F. 2003. Usos de la tierra en fincas ganaderas. Guía para el pago de servicios ambientales en el Proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas. Murgueitio, E. ed. Cali, CO, Fundación CIPAV. 97 p.
- Murgueitio, E; Ibrahim, M. 2008. Ganadería y medio ambiente en América Latina. In

- Murgueitio, E; Cuartas, C; Naranjo, J. eds. Ganadería Del Futuro: Investigación para el Desarrollo. Cali, CO, Fundación CIPAV. p 19-39.
- MVOTMA (Ministerio de la Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Uruguay). 2003. Cambio climático: compendio informativo (en línea). Consultado 9 sept. 2004. Disponible en: http://unfccc.int/resource/iuckit/infokit_es.pdf
- Nelson, BW; Mesquita, R; Pereira, JLG; Souza, S de; Batista, G; Couto, L. 1999. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology Management* 117:149-167.
- Noguera, E; Abreu, O; Azocar, R; Acosta, R. 1994. Comportamiento productivo de un rebaño mestizo indefinido en el Sur del Lago de Maracaibo. *Zootecnia Tropical* 12(1):99-114.
- Obispo, N; Espinoza, Y; Gil, J; Ovalles, F; Rodríguez, M. 2008. Efecto del sombreado sobre la producción y calidad del pasto guinea (*Panicum maximum*) en un sistema silvopastoril. *Zootecnia Tropical* 26(3):285-288.
- O'Hara, P; Freney, J; Ulyatt, M. 2003 Abatement of agricultural non-carbon dioxide greenhouse gas emissions. A study of research requirements. NZ, Ministry of Agriculture and Forestry, Wellington. 177 p.
- Ojeda, A; Escobar, A. 1997. Manejo de vacas doble propósito en potreros con asociación entre gramíneas y *Gliricidia sepium*. *Rev. Fac. Agronomía LUZ*: 14:641-648.
- Orrego, S; Del Valle, J. 2003. Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios intervenidos y secundarios. In Orrego, SA; Valle JI del; Moreno, FH. eds. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia, contribuciones para la mitigación del cambio climático. Bogotá, CO. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ciencias Forestales / Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente (CAEMA). p 215-248.
- Orskov, E; Hovell, F; Mould, F. 1980. Uso de la técnica de la bolsa de nylon para la evaluación de los alimentos. *Producción Animal Tropical* 5:213-233.
- Overman, JP; Witte, HJ, Saldarriaga, JG. 1994. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology* 10:207-218.
- Palm, C; Tomich, T; Noordwijk, M. van; Vosti, S; Gockowski, J; Alegre, J; Verchot, L. 2004. Mitigation GHG emissions in the humid tropics: case studies from alternatives to slash-and-burn program (ASB). *Environment, Development and Sustainability* 6:145-162.

- Pagiola, S; Agostini, P; Gobbi, J; Haan, C; Ibrahim, M; Murgueitio, E; Ramírez, E; Rosales, M; Ruiz, J. 2004. Payin for biodiversity conservation services in agricultural landscapes. The World Bank Environmental Department. Paper No. 96. Washington, US, World Bank. 37 p.
- Panos (The Panos Institute). 2000. Just a lot of hot air? A close look at the climate change convention. London, UK, Panos. 44 p.
- Pedroni, L. 2000. Implementación conjunta y desarrollo limpio: una nueva oportunidad para Centro América. Turrialba, CR. CATIE – INTERCOOPERATION. 39 p. (Informe técnico 12).
- Peña, M; Urdaneta, F; Arteaga, G; Casanova, A. 1997. Caracterización del recurso animal en sistemas de ganadería bovina de doble propósito. Rev. Fac. Agronomía LUZ 14:573-587.
- Pezo, D; Ibrahim, M. 1996. Sistemas silvopastoriles, una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. In Pastoreo intensivo en zonas tropicales. Primer Foro Internacional. Veracruz, MX, FIRA/Banco de México. 35 p.
- Pezo, D; Ibrahim, M. 1999. Sistemas silvopastoriles. Módulo de Enseñanza Agroforestal No. 2. Turrialba, CR .Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. 275 p.
- Pla Sentis, I. 1977. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Curso de Postgrado en Ciencia del Suelo. Maracay, VE, FAGRO-UCV. 91 p.
- Plasse, D. 1992. Presente y futuro de la producción bovina en Venezuela. In Gonzalez-Stagnaro, C. ed. Ganadería Mestiza de Doble Propósito. Maracaibo, VE. GIRARZ p. 1- 24.
- Preston, T; Leng, R. 1989. The greenhouse effect and its implications for world agriculture. The need for environmentally friendly development. Livestock Research for Rural Development 1(1). (en línea). Consultado Nov. 2004. Disponible en: <http://www.cipav.org.co/lrrd>
- Ramos, R. 2003. Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas – Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 77 p.
- Reid, R; Thornton, P; McCrabb, G; Kruska, R; Atieno, F; Jones, P. 2004. Is it possible o mitigate greenhouse gas emissions in pastoral ecosystems of the tropics? Environmental, Development and Sustainability 6:91-109.
- Rey, J; Messa, HF; Vera, E; Mújica, M. 2005. Descripción de suelos representativos del

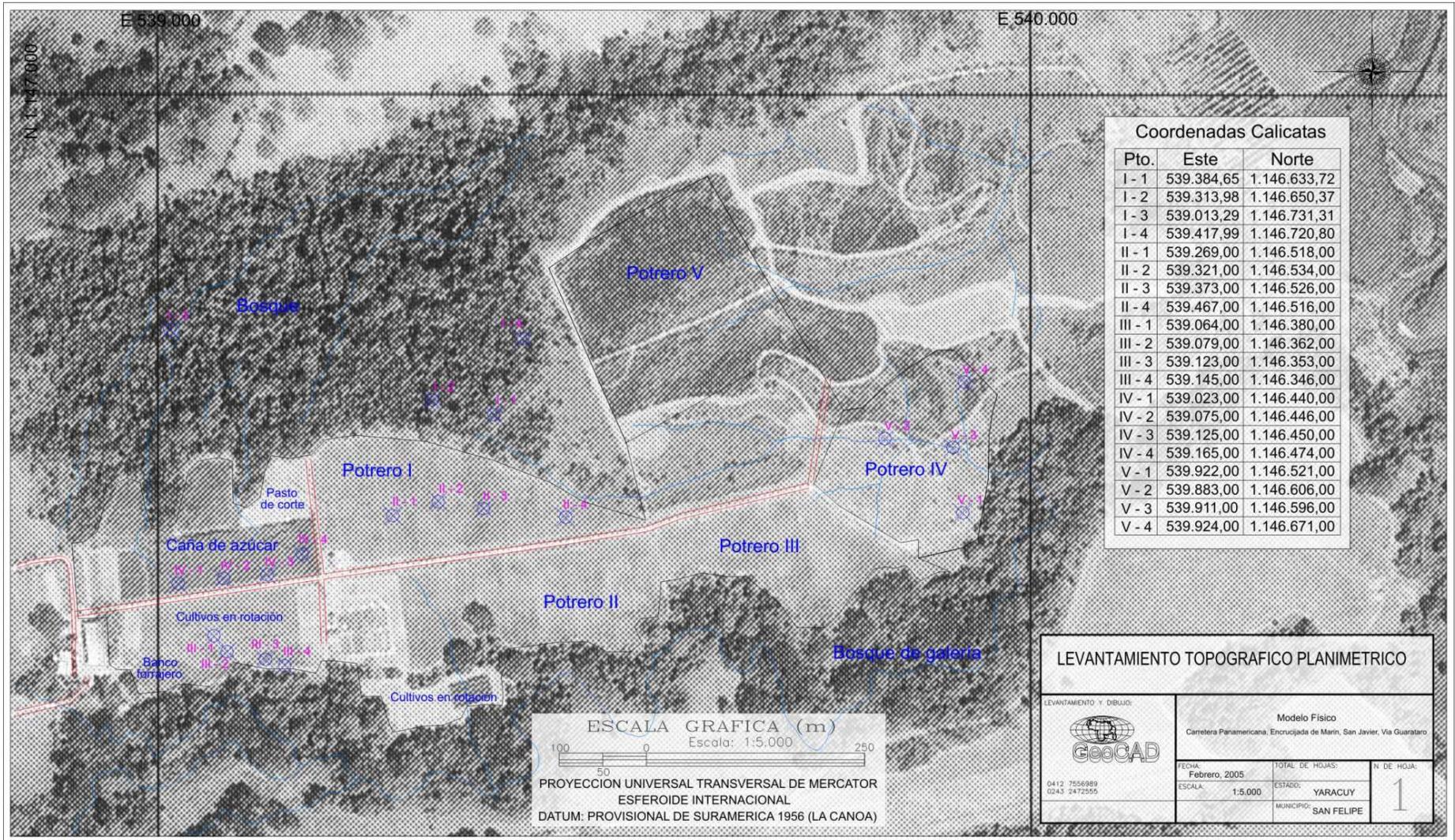
- Modelo Físico ATS de la Fundación Danac. Maracay, VE. Mimeo. 20 p.
- Rojas, J. 2005. Secuestro de carbono y uso de agua en sistemas silvopastoriles con especies maderables nativas en el trópico seco de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 71 p.
- Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 106 p.
- Ruiz-Silvera, C; Salaverría, J; Valles, C; Yépez, J; Herrera, S. 2008. Comportamiento de gallinas criollas (gen Na) en un sistema semi-libre y alimentadas con recursos alternativos en Yaracuy, Venezuela. (en línea). *Livestock Research for Rural Development* 20 (5). Consultado 7 Jul. 2008. Disponible en: http://www.cipav.org.co/index.php?option=com_wrapper&Itemid=64.
- Saldarriaga, J. 1994. Recuperación de la selva de "Tierra Firme" en el alto río Negro Amazonía Colombiana-Venezolana. *Estudios en la Amazonía Colombiana*. Tropenbos, Bogotá, CO.
- Sandoval, E; Valle, A; Jiménez, D; Márquez, O. 2005. Evaluación de pesos al nacer y crecimiento en becerros doble propósito amamantados con vacas nodrizas durante la etapa de lactantes. *Zootecnia Tropical* 23(1):1-16.
- SAS (SAS Institute Inc, US).1988. SAS Introductory guide for personal computers. Versión 6.03. Cary, NC. 111 p.
- Schroth, G; Vanlauwe, B; Lehmann, J. 2003. Soil organic matter. In G. Schroth; F.L. Sinclair. eds. *Trees, crops and soil fertility. Concepts and research methods*. Cambridge, USA, CABI Publishing. p 77-91.
- Segura, M; Kanninen, M. 2002. Inventarios para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. In L. Orozco; C. Brumér eds. *Inventarios Forestales para Bosques Latifoliados en América Central*. Turrialba, CR, CATIE. p 202-216.
- Segura, M. 2005. Estimación del carbono almacenado y fijado en sistemas agroforestales indígenas con cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Proyecto Captura de Carbono y Desarrollo de Mercados Ambientales en Sistemas Agroforestales Indígenas con Cacao en Costa Rica (TF-052118). Informe final de consultoría. Turrialba, CR. 147 p.
- Steinfeld, H. 2000. Producción animal y el medio ambiente en Centroamérica. In C. Pomareda y H. Steinfeld. Eds. *Intensificación de la ganadería en Centroamérica: Beneficios económicos y ambientales*. San José, CR, CATIE/FAO/SIDE. p. 17-32.

- Soil Survey Staff. 1998. Keys to Soil Taxonomy. Eight Edition. Washington D.C., USA, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Solórzano, N; Alvarado, N. 2004. Fertilización orgánica en plantaciones forestales. In IV Congreso Forestal Venezolano. (en línea). Consultado: Jul. 2008. Disponible en: <http://www.conforve.ula.ve/WEB/Carteles/SolorzanoAlvaradoFertilizacionorganica.pdf>
- Steel, R; Torrie, H. 1996. Bioestadística: principios y procedimientos. Trad. R. Martínez. 2 ed. México, MX, McGraw-Hill. 622 p.
- Torres, S; Madero, L. 1999. Suelos de referencia de la Depresión del Yaracuy (Valle Alto y Medio). Resumen de características. Maracay, VE, FAGRO-UCV. 75 p. (Boletín Técnico N° 3).
- UCV (Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela). 1999. Proyecto "Caracterización de los suelos para el establecimiento de una línea base de información según el tipo de utilización de la tierra y colección de suelos representativos (macromonolitos) en la Fundación para la Investigación Agrícola Danac". Informe Final. 75 p.
- Vaccaro, L; Vaccaro, R; Verde, O. 1991. Productividad de bovinos de doble propósito. In D. Plasse, N. Peña de Borsotti y J. Arango. Eds. VII Cursillo sobre Bovinos de Carne. Maracay, VE, Fac. Cs. Veterinarias UCV. pp. 23-39.
- Vaccaro, L; López, D. 1995. Taller de trabajo latinoamericano sobre el mejoramiento genético de bovinos de doble propósito. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal. 2(1): 15 p. (Edición especial).
- Villanueva, C; Ibrahim; M; Ríos, J; Suárez, J. Disponibilidad de *Brachiaria brizantha* en potreros con diferentes niveles de cobertura arbórea en el trópico subhúmedo de Costa Rica. Zootecnia Tropical 26(3):293-296.
- Wattel-Koekkoek, E. 2002. Clay-associated organic matter in kaolinitic and smectitic soils. Tesis PhD. NL, Wageningen Agricultural University. 120 p.
- White, R. 2006. Principles and practice of soil science. The soils as a natural resource. 4th ed. Oxford, UK, Blackwell Publishing. 212 p.
- Wilkerson, V; Casper, D; Mertens, D. 1995. The prediction of methane production of Holstein cows by several equations. Journal Dairy Science 78:2402-2414.
- Wood, P. 1967. Algebraic model of the lactation curve in cattle. Nature 216:164-165.
- World Agroforestry Center. 2006. Wood density database (en línea). Consultado 15 jun. 2006. Disponible en <http://www.worldagroforestry.org/sea/products/afdbases/wd/index.htm>

- Zambrano, A. 1986. Estudio agroecológico a nivel semidetallado en 346,9 ha ubicadas en la Hacienda El Naranjal, Municipio San Felipe, estado Yaracuy, Venezuela. Informe. 165 p.
- Zapata, M, Colorado GJ, Del Valle JI. 2003. Ecuaciones de biomasa aérea para bosques primarios intervenidos y secundarios. In. Orrego, SA; Del Valle JI; Moreno, FH. eds. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia, contribuciones para la mitigación del cambio climático. Bogotá, CO. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ciencias Forestales / Centro Andino para la Economía del Medio Ambiente (CAEMA). p 87-120.
- Zech, W; Senesi, N; Guggenberger, G; Kaiser, K; Lehmann, J; Miano, T; Miltner, A; Schrot, G. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79:117-161.

8 ANEXOS

Anexo 1. Plano General del Modelo de Granja Integral Sostenible “Aguiles Escobar Boves”, Fundación Danac, San Javier, Estado Yaracuy, Venezuela. 2005.



Anexo 2. Ubicación de las calicatas principales para el muestreo de suelos por tipo de uso de la tierra, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Coordenadas U.T.M. Datum: Provisional de Suramérica 1956 (La Canoa).

TUT	Ubicación	Parcela	Coordenadas	
			Oeste	Norte
BP	Fragmento de bosque primario	1	539.384	1.146.633
		2	539.313	1.146.650
		3	539.013	1.146.731
		4	539.418	1.146.731
PCL	Potrero I-3	1	539.269	1.146.518
		2	539.321	1.146.534
		3	539.373	1.146.526
		4	539.467	1.146.516
BF	Lote 10-B	1	539.064	1.146.380
		2	539.079	1.146.362
		3	539.123	1.146.353
		4	539.145	1.146.346
CAZ	Lote 8-A	1	539.023	1.146.440
		2	539.075	1.146.446
		3	539.125	1.146.450
		4	539.165	1.146.474
PAD	Potrero 4	1	539.922	1.146.521
		2	539.883	1.146.606
		3	539.911	1.146.596
		4	539.924	1.146.671

Donde: BP= bosque primario, PCL= pastura en callejones de *L. leucocephala*, BF= banco forrajero, CAZ= caña de azúcar, PAD= pastura con árboles dispersos.

Anexo 3. Producción de leche y duración de la lactancia en vacas mestizas del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 1998-2003.

Grupo	Producción total de leche (kg lactancia ⁻¹)		Duración de la lactancia (días)		n
	Prom ± DE	CV (%)	Prom ± DE	CV (%)	
1	3.064,2 ± 214,8	7,0	296,7 ± 18,7	6,3	12
2	2.404,3 ± 161,1	6,7	290,1 ± 27,9	9,6	29
3	1.850,4 ± 146,4	7,9	245,5 ± 33,8	13,8	46
4	1.311,6 ± 161,4	12,3	199,1 ± 43,9	22,0	15
5	674,9 ± 176,2	26,1	114,5 ± 46,3	40,4	8

Donde: Prom= promedio, DE= desviación estándar y CV= coeficiente de variación. Grupos de vacas establecidos según registros de producción total de leche del rebaño.

Anexo 4. Familias, especies e individuos muestreados en un fragmento de bosque primario, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Familia	Especie	Nombre común	Distribución diamétrica (cm) y número de individuos				Total
			0 - 4,99	5,0 - 9,99	10,0 - 29,99	≥30	
Acantaceae	<i>Aphelandra terragona</i> (Vahl) Nees	ND	10				10
Anacardiaceae	<i>Astronium graveolonens</i> Jacq.	Gateado	5	9	10	1	25
	<i>Spondia mombin</i> L.	Jobo	1			2	3
Bignoniaceae	<i>Jacaranda obtusifolia</i> Humb.-Bonpl.	Jacaranda			1		1
	<i>Tabebuia ochracea</i> Standley	Araguan	1	1	2		4
	<i>Memora cladotricha</i> Sanwith	ND	7				7
Bombacaceae	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Ceiba		1	2		3
Burseraceae	<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Indio desnudo			4	1	5
Caparidaceae	<i>Capparis odoratissima</i> Jacq.	Zamurito	1				1
	No determinada	ND	2				2
Euphorbiaceae	<i>Hura crepitans</i> L.	Jabillo	1	1	1	1	4
	<i>Croton gossypifolius</i> Vahl	ND	1				1
	No determinada	ND	2				2
Fabaceae	<i>Bauhinia</i> sp.	Pata de vaca	3	1			4
	<i>Piptadenia pittieri</i> Harms.	Tiama	10	3	9		22
	<i>Machaerium humboldtiana</i> Vogel	Arañagato	1				1
	No determinada	ND	1				1
	<i>Acacia glomerosa</i> Benth.	ND	1				1
	<i>Machaerium rhobiniifolium</i> (DC.) Vogel	Cascarón	1		3	1	5
	<i>Inga vera</i> Benth.	Guamo de montaña	1	2			3
	<i>Brownea coccinea</i> Jacq.	Rosa de montaña	1		3		4
	<i>Pithecellobium ligustrinum</i> (J) Klotzsch	ND		1			1
Flacurtiaceae	<i>Casearia</i> sp.	ND	1				1
	No determinada	ND	8				8
Lecythidaceae	<i>Gustavia yaracuyensis</i> Pittier	Muertico	11				11
Mirtaceae	<i>Eugenia</i> sp.	Guayabón		1	1		2
	No determinada	ND	3			1	4
Moraceae	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) Steud.	Mora		2	4		6
	<i>Brosimum alicastrum</i> Swartz	ND		1			1
Rubiaceae	<i>Psychotria occidentales</i> Steyerem.	ND	17	2	1		20
	<i>Simira eritroxylon</i> (Willd.) Brem.	ND	1	1	2	1	5
	<i>Rudgea hostmanniana</i> Benth.	ND	1				1
	<i>Randia dioica</i> H. Karst.	ND			1		1
	No determinada	ND		1			1
Sapindaceae	<i>Melicocca bijugatus</i>	Mamón	1				1
	<i>Matayba scrobiculata</i> (Kunth) Radlk.	Zapatero			1		1
	<i>Talisia hexaphylla</i> Vahl	Masamorro				1	1
	No determinada	ND	1	1			2
Sterculiaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Guácimo		1	9		10
Teophrastaceae	<i>Clavija nobilis</i> Mez.	ND	1				1
Verbenaceae	<i>Petrea aspera</i> Turez	ND	3				3
ND	ND	Fruto paloma	2	2	1		5
	ND	ND	6		1		7
Total			106	31	57	9	203

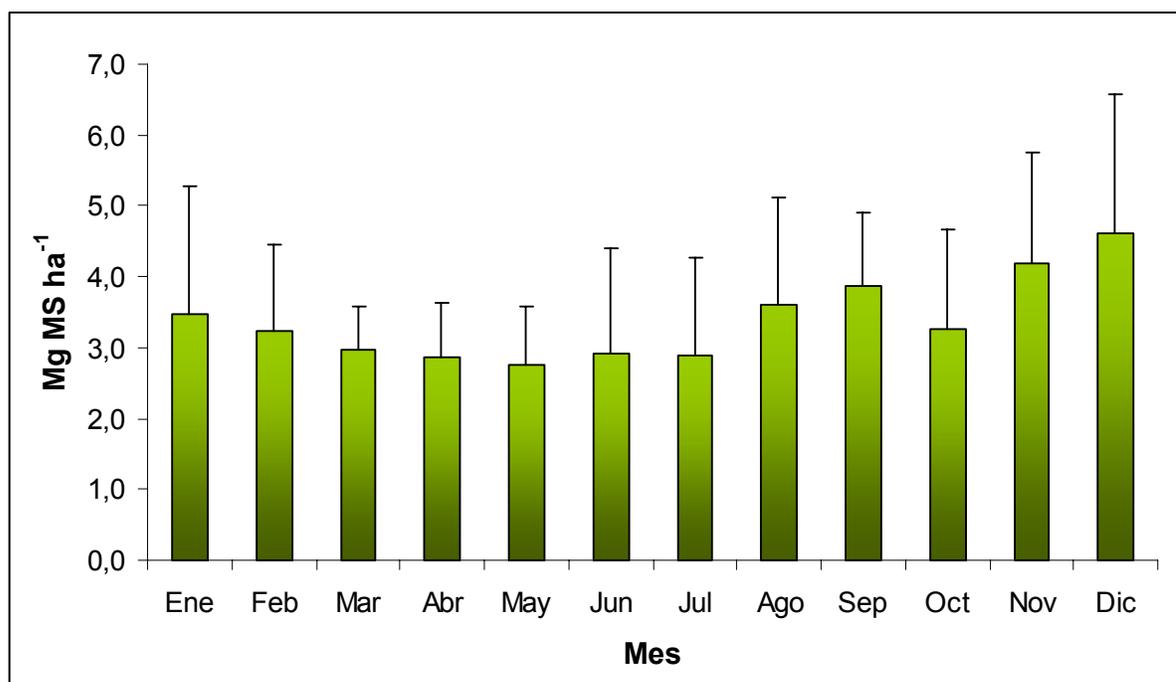
Anexo 5. Familias, especies e individuos muestreados por clase diamétrica en el TUT PAD en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Familia	Especie	Nombre común	Clase diamétrica (cm) y número de individuos				
			0-4,99	5,0 - 9,99	10,0 - 29,99	>30	Total
Anacardiaceae	<i>Spondia mombin</i> L.	Jobo			1	3	4
Bignoniaceae	<i>Tabebuia rosea</i>	Apamate		1	1		2
	<i>Crescentia cujete</i>	Totumo		1			1
Bombacaceae	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Ceiba	1	4	3		8
Boraginaceae	<i>Cordia thaisiana</i>	Pardillo	2	1	1		4
	<i>Cordia colococca</i>	Candelerero			3	1	4
Capparidaceae	<i>Crataeva tapia</i>	Cojón de chivo			2		2
Fabaceae	<i>Pterocarpus officinallis</i>	Tasajo	15	71	65	2	153
	<i>Albizia psitacifolia</i>	Hueso de pescado	1	3	10	12	26
	<i>Gliricidia sepium</i>	Mata ratón		10	27	1	38
	<i>Machaerium rhobiniifolium</i> (DC.) Vogel	Cascarón		1	4		5
	<i>Samanea saman</i>	Samán			5	42	47
	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Caro-caro			3	14	17
Malvaceae-Sterculiodesae	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Guácimo		3	36	25	64
	<i>Sterculia apetala</i>	Camoruco				1	1
Meliaceae	<i>Swietenia macrophylla</i>	Caoba		1			1
	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro		1			1
Moraceae	<i>Maclura tinctoria</i> (L.) Steud.	Mora	3	5			8
Myrtaceae	<i>Psidium guajaba</i>	Guayabo	1				1
Palmae	<i>Acrocomia aculeata</i>	Corozo		1	1	2	4
Verbenaceae	<i>Melina arborea</i>	Melina		1	4		5
	<i>Tectona grandis</i>	Teca			3		3
No determinada	No determinada	Fruto de paloma	1				1
		Jebe negro		1	1		2
Total			24	105	170	103	402

Anexo 6. Biomasa disponible, biomasa residual y carbono total almacenado en la pastura del TUT PCL, MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Mes	Disponibilidad	Biomasa residual	Carbono total
	(Mg MS ha ⁻¹)		(Mg ha ⁻¹ mes ⁻¹)
Febrero	5,51 ± 1,66	4,89 ± 1,71	2,44 ± 0,85
Marzo	5,59 ± 2,10	4,36 ± 1,24	2,18 ± 0,62
Abril	4,97 ± 1,55	3,67 ± 1,22	1,83 ± 0,61
Mayo	3,89 ± 1,84	3,17 ± 1,13	1,58 ± 0,56
Junio	4,62 ± 2,70	3,50 ± 1,96	1,75 ± 0,98
Julio	3,30 ± 1,51	2,56 ± 0,95	1,28 ± 0,47
Promedio	4,86	3,76	1,88
Desviación estándar	0,87	0,73	1,88
c.v (%)	17,98	19,39	19,39
n	13	13	

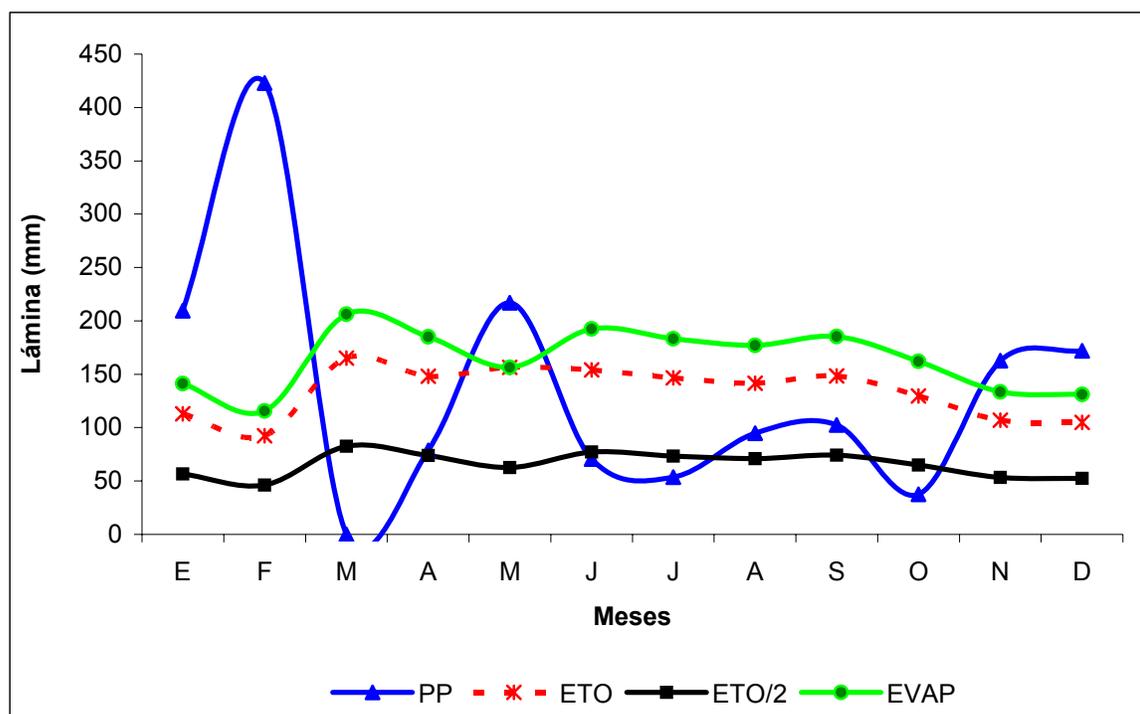
Anexo 7. Rendimiento mensual promedio de las gramíneas en pasturas del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 1998 – 2004.



Donde: Las barras representan la desviación estándar.

Fuente: Base de datos Programa Agricultura Tropical Sostenible.

Anexo 8. Climadiagrama de San Javier, estado Yaracuy, Venezuela. 2005.



Donde: PP: precipitación, ETO: evapotranspiración, ETO/2: evapotranspiración media y Evap: evaporación.

Fuente: Estación Climatológica Naranjal (10°21'45"N; 68°39'00"O; 107 m de altitud.) - Convenio Fundación Danac – MARN.

Anexo 9. Análisis físicos y químicos de suelos del TUT BP, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Parcela	1										2									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
	(%)			(%)			(%)				(%)									
0 - 5	6,58	58,00	26,00	16,00	Fa	1,34	20,58	18,94	39,52	2,63	7,36	68,00	14,00	18,00	Fa	1,42	21,15	21,23	42,37	8,43
5 - 20	1,35	58,00	24,00	18,00	Fa	1,38	23,54	11,74	35,29	0,23	4,53	60,00	18,00	22,00	FAa	1,51	21,48	18,59	40,07	11,76
20 - 40	0,90	54,00	26,00	20,00	Fa	1,52	23,78	10,73	34,51	0,73	7,84	45,00	22,00	33,00	FAa	1,65	27,76	11,93	39,69	1,38
40 - 100	6,13	50,67	22,67	26,67	FAa	1,78	30,87	7,45	38,32	0,63	12,13	34,00	24,00	42,00	A	1,67	35,58	7,60	43,19	0,24
Parcela	3										4									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
	(%)			(%)			(%)				(%)									
0 - 5	6,54	54,00	26,00	20,00	Fa	1,26	30,47	18,42	48,89	5,11	9,73	60,00	22,00	18,00	Fa	1,35	24,26	18,50	42,76	3,17
5 - 20	4,88	48,00	20,00	32,00	FAa	1,24	26,73	15,33	42,05	1,10	7,23	44,00	36,00	20,00	F	1,44	22,40	15,08	37,48	1,03
20 - 40	7,42	22,00	26,00	52,00	A	1,56	37,48	8,26	45,74	1,62	6,95	42,00	26,00	32,00	FA	1,50	25,99	10,24	36,23	0,50
40 - 100	11,21	25,33	29,30	45,33	A	1,65	36,42	5,28	41,70	0,91	8,05	43,33	24,67	32,00	FA	1,66	29,73	6,82	36,55	0,40

Parcela	1										2									
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹
		mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹								
0 - 5	5,27	6,00	63,00	466,00	156,00	1478,50	135,45	1,60	0,05	5,55	4,73	8,00	69,00	294,00	100,00	1816,50	191,70	2,23	0,11	7,37
5 - 20	4,63	3,00	21,00	202,00	96,00	645,10	90,00	0,71	0,03	3,05	4,53	6,00	36,00	178,00	66,00	804,75	96,25	1,00	0,05	5,10
20 - 40	4,67	1,00	13,00	124,00	58,00	268,35	28,25	0,30	0,02	1,83	4,53	2,00	24,50	92,00	162,00	255,23	149,55	0,43	0,09	6,01
40 - 100	4,48	1,83	23,83	75,67	166,33	285,23	107,38	0,23	0,03	5,19	4,53	1,00	24,00	74,00	258,00	136,80	241,60	0,36	0,15	8,83
Parcela	3										4									
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹
		mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹								
0 - 5	5,03	9,00	92,00	736,00	236,00	1998,00	262,80	3,09	0,12	13,05	5,40	8,00	134,00	632,00	192,00	1929,00	180,35	2,25	0,08	8,02
5 - 20	4,64	4,00	32,00	266,00	214,00	1093,00	149,65	1,22	0,05	8,98	4,97	4,00	46,00	392,00	122,00	1172,00	108,15	1,17	0,05	5,27
20 - 40	4,34	1,00	31,00	158,00	296,00	1665,70	203,30	0,78	0,13	14,48	4,67	1,00	17,00	196,00	129,00	669,60	65,98	0,38	0,06	6,69
40 - 100	4,29	1,83	29,33	104,67	322,67	467,62	243,76	0,41	0,33	13,66	4,71	1,00	19,33	92,67	231,33	314,17	137,68	0,25	0,22	8,35

Anexo 10. Análisis físicos y químicos de suelos del TUT PCL del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Parcela	1										2									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
		(%)					(%)					(%)								
		0 - 5					5 - 20					20 - 40					40 - 100			
0 - 5	3,05	40,00	34,00	26,00	F	1,62	27,73	11,17	38,90	9,09	1,01	58,00	24,00	18,00	Fa	1,62	30,58	7,70	38,28	3,56
5 - 20	2,43	38,00	34,00	28,00	FA	1,69	29,41	8,35	37,76	0,06	1,99	52,00	26,00	22,00	FAa	1,76	24,11	9,77	33,88	2,74
20 - 40	6,37	30,00	36,00	34,00	FA	1,62	27,61	7,77	35,38	0,09	8,91	52,00	24,00	24,00	FAa	1,85	26,80	4,81	31,61	0,10
40 - 100	6,12	24,00	36,00	40,00	A	1,82	28,98	5,15	34,13	6,12	11,03	48,00	20,00	32,00	FAa	1,88	30,10	5,70	35,81	2,91

Parcela	3										4									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
		(%)					(%)					(%)								
		0 - 5					5 - 20					20 - 40					40 - 100			
0 - 5	1,24	58,00	24,00	18,00	Fa	1,40	27,49	17,90	45,38	3,79	1,11	60,00	22,00	18,00	Fa	1,58	23,66	14,49	38,16	3,73
5 - 20	0,56	56,00	24,00	20,00	Fa	1,62	22,98	12,99	35,97	0,39	0,77	64,00	16,00	20,00	Fa	1,71	19,99	15,78	35,77	1,24
20 - 40	6,09	48,00	25,00	27,00	FAa	1,71	30,28	7,20	37,48	0,56	5,43	38,40	30,00	31,60	FA	1,71	26,63	10,30	36,93	1,92
40 - 100	7,94	42,00	22,00	36,00	FAa	1,79	31,14	5,57	36,71	0,60	8,30	48,80	18,00	33,20	FAa	1,86	30,27	5,54	35,81	0,40

Parcela	1										2												
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹			
		mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹											
		0 - 5										5 - 20									20 - 40		
0 - 5	5,53	8,00	51,00	832,00	212,00	2083,50	219,20	2,16	0,04	8,91	5,85	16,00	36,00	512,00	144,00	1486,00	140,45	1,45	0,03	3,97			
5 - 20	6,26	17,00	69,00	868,00	206,00	880,50	90,20	0,68	0,03	6,13	5,59	8,00	22,00	402,00	98,00	678,05	94,55	0,50	0,02	2,50			
20 - 40	7,22	3,00	45,00	1148,00	332,00	545,25	85,70	0,28	0,03	8,51	5,80	2,00	20,00	452,00	118,00	515,30	94,95	0,24	0,02	2,76			
40 - 100	7,89	1,00	38,00	782,00	400,00	374,35	115,90	0,11	0,11	11,59	4,94	1,00	31,00	612,00	304,00	493,80	133,55	0,19	0,02	7,32			

Parcela	3										4												
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	Ctotal (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	Ctotal (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹			
		mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹											
		0 - 5										5 - 20									20 - 40		
0 - 5	5,26	7,00	49,00	394,00	148,00	1742,50	153,80	1,65	0,04	4,97	5,24	11,00	53,00	468,00	154,00	2047,50	188,10	2,00	0,07	5,05			
5 - 20	5,36	7,00	20,00	236,00	84,00	818,10	61,80	0,60	0,02	2,32	4,95	3,00	15,00	158,00	52,00	986,00	59,30	0,74	0,03	2,24			
20 - 40	5,03	3,50	26,00	188,00	151,00	690,50	113,28	0,36	0,04	4,73	4,97	4,00	17,50	80,50	122,00	732,30	113,35	0,31	0,04	4,55			
40 - 100	5,04	1,00	25,00	246,00	246,00	756,95	164,30	0,40	0,07	7,88	5,00	2,00	22,00	79,00	202,00	808,85	176,50	0,30	0,07	7,20			

Anexo 11. Análisis físicos y químicos de suelos del TUT BF del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Parcela	1										2									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
	(%)			(%)			(%)				(%)									
0 - 5	3,35	34,80	38,00	27,20	F	1,53	31,51	11,34	42,85	0,14	1,61	38,80	38,00	23,20	F	1,41	31,64	12,05	43,69	4,26
5 - 20	4,25	34,80	38,00	27,20	F	1,66	31,76	9,82	41,58	2,57	1,71	40,80	32,00	27,20	F	1,61	29,37	15,18	44,55	0,34
20 - 40	1,53	54,80	20,00	25,20	FAa	1,79	27,28	10,95	38,23	0,83	2,24	36,80	34,00	29,20	FA	1,53	27,07	8,58	35,64	0,34
40 - 100	16,27	14,80	54,00	31,20	FAL	1,62	41,82	5,08	46,90	0,51	3,74	32,80	40,00	27,20	F	1,52	28,94	9,91	38,85	0,90
Parcela	3										4									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
	(%)			(%)			(%)				(%)									
0 - 5	1,92	40,80	34,00	25,20	F	1,31	29,84	11,48	41,31	9,19	5,14	34,80	36,00	29,20	FA	1,28	30,10	14,29	44,39	4,74
5 - 20	2,43	40,80	32,40	26,80	F	1,67	28,60	11,90	40,49	1,99	6,55	34,80	36,00	29,20	FA	1,59	31,08	8,33	39,41	4,87
20 - 40	4,95	40,80	29,00	30,20	FA	1,63	25,86	9,94	35,80	1,94	4,06	40,80	32,00	27,20	F	1,84	29,63	8,06	37,69	4,83
40 - 100	6,59	42,13	26,67	31,20	FA	1,86	28,74	6,85	35,60	1,16	10,77	26,13	41,17	32,70	FA	1,69	33,31	6,67	39,98	0,71

Parcela	1										2									
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹
	mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹									
0 - 5	6,24	24,00	121,00	994,00	288,00	1825,00	152,55	1,33	0,07	9,13	6,07	10,00	111,00	866,00	278,00	1680,50	171,30	1,61	0,05	8,99
5 - 20	5,59	20,00	54,00	902,00	222,00	1235,00	157,65	0,78	0,05	9,12	6,09	4,00	49,00	832,00	232,00	1100,00	109,20	0,78	0,03	7,79
20 - 40	5,87	10,00	41,00	876,00	174,00	877,05	77,70	0,41	0,02	5,32	6,46	2,00	49,00	1028,00	212,00	751,55	82,25	0,25	0,03	7,06
40 - 100	7,25	3,00	33,00	1860,00	450,00	548,25	123,75	0,13	0,05	9,23	8,51	3,00	39,00	4360,00	342,00	675,10	62,15	0,19	0,13	7,53
Parcela	3										4									
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹
	mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹									
0 - 5	6,05	11,00	102,00	814,00	254,00	1753,50	157,55	1,63	0,04	7,45	6,62	26,00	201,00	1166,00	260,00	1936,50	180,15	1,81	0,06	9,95
5 - 20	5,87	9,40	64,40	958,00	202,80	1254,70	103,67	0,87	0,03	6,95	6,61	16,00	81,00	1122,00	166,00	1269,00	97,30	0,87	0,05	8,95
20 - 40	6,41	4,50	56,50	1373,50	293,50	940,48	71,86	0,36	0,03	6,84	7,14	4,00	39,00	1190,00	156,00	821,30	66,90	0,28	0,03	6,58
40 - 100	7,62	2,33	51,00	1500,00	321,33	719,33	78,32	0,15	0,07	7,34	7,86	3,08	46,33	1455,83	359,50	738,48	80,33	0,20	0,05	9,53

Anexo 12. Análisis físicos y químicos de suelos del TUT CAZ del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Parcela	1										2									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
	(%)						(%)				(%)									
0 - 5	6,21	28,80	38,00	33,20	FA	1,66	33,88	10,17	44,05	1,36	5,66	38,80	34,00	27,20	F	1,49	27,96	13,93	41,88	2,18
5 - 20	5,63	28,80	36,00	35,20	FA	1,78	27,14	10,14	37,28	0,16	2,77	34,80	32,00	33,20	FA	1,92	29,62	8,68	38,30	0,72
20 - 40	6,92	28,80	34,20	37,00	FA	1,56	32,23	10,14	42,37	0,03	5,01	38,80	30,00	31,20	FA	1,85	28,46	7,91	36,37	0,67
40 - 100	6,45	27,20	38,80	34,00	FA	1,68	32,22	6,11	38,33	0,01	6,84	47,13	25,00	27,87	FAa	1,80	24,31	8,41	32,72	0,13
Parcela	3										4									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
	(%)						(%)				(%)									
0 - 5	7,31	38,80	32,00	29,20	FA	1,47	25,28	9,17	34,45	0,66	2,68	38,80	34,00	27,20	F	1,61	29,59	11,52	41,11	0,37
5 - 20	4,51	36,80	32,00	31,20	FA	1,53	23,52	10,61	34,13	0,24	5,23	34,80	40,00	25,20	F	1,74	27,85	9,29	37,14	0,32
20 - 40	3,69	40,80	28,00	31,20	FA	1,79	27,15	7,68	34,82	0,08	7,96	40,80	28,00	31,20	FA	1,70	27,24	8,54	35,78	0,06
40 - 100	6,99	36,80	30,00	33,20	FA	1,82	31,82	6,28	38,11	0,01	9,58	20,80	36,00	43,20	A	1,88	26,67	3,27	29,94	0,89

Parcela	1										2									
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹
		mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹								
0 - 5	5,95	26,00	92,00	1014,00	282,00	1516,00	148,15	1,33	0,04	11,49	6,02	18,00	96,00	1102,00	356,00	2200,50	206,65	2,31	0,04	12,50
5 - 20	6,68	17,00	44,00	1050,00	286,00	991,25	74,50	0,56	0,04	10,63	6,51	14,00	38,00	948,00	234,00	1076,30	96,85	0,65	0,03	8,37
20 - 40	7,29	7,10	35,00	1026,60	345,40	780,88	76,30	0,24	0,05	10,12	7,20	9,00	40,00	1096,00	296,00	719,05	70,00	0,17	0,03	7,62
40 - 100	7,69	7,60	36,40	844,80	379,20	693,46	77,26	0,12	0,08	8,83	7,19	11,50	39,17	871,00	257,67	662,51	51,50	0,08	0,03	5,43
Parcela	3										4									
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹
		mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹								
0 - 5	6,06	19,00	93,00	970,00	302,00	1794,50	146,25	1,65	0,04	10,86	5,90	27,00	88,00	868,00	306,00	1745,50	157,90	1,63	0,05	10,52
5 - 20	6,38	9,00	43,00	988,00	250,00	1027,05	68,05	0,53	0,03	8,60	5,95	14,00	40,00	812,00	220,00	1053,15	71,15	0,57	0,03	8,01
20 - 40	6,80	5,00	44,00	1242,00	308,00	799,55	83,35	0,21	0,02	9,29	6,73	6,00	45,00	842,00	236,00	815,35	77,10	0,19	0,03	8,47
40 - 100	7,06	8,00	36,00	1078,00	422,00	697,35	75,90	0,11	0,03	7,96	7,83	5,00	47,00	850,00	520,00	658,25	61,00	0,05	0,05	10,39

Anexo 13. Análisis físicos y químicos de suelos del TUT PAD del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Parcela	1										2									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
	(%)						(%)				(%)									
0 - 5	10,11	60,80	18,00	21,20	FAa	1,57	24,86	13,89	38,75	1,36	15,28	34,80	38,00	27,20	F	1,46	35,81	6,03	41,85	0,79
5 - 20	6,94	60,13	16,00	23,87	FAa	1,79	24,98	14,21	39,19	8,53	11,59	33,20	34,80	32,00	FA	1,46	30,48	7,32	37,80	0,18
20 - 40	6,40	54,80	16,00	29,20	FAa	1,89	29,69	7,96	37,65	0,92	7,57	22,80	40,00	37,20	FA	1,54	31,04	11,39	42,43	0,88
40 - 100	3,68	61,80	13,67	24,53	FAa	1,76	25,83	10,52	36,35	1,78	3,43	43,33	28,27	28,40	FA	1,61	29,11	11,23	40,35	0,46
Parcela	3										4									
Profundidad (cm)	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹	%H g g ⁻¹	a	L	A	Clase textural	Da Mg m ⁻³	Poros Ø<15 µm	Poros Ø>15 µm	EPT	Ks cm h ⁻¹
	(%)						(%)				(%)									
0 - 5	23,21	12,80	56,00	31,20	FAL	1,51	43,93	4,23	48,16	0,67	10,61	50,80	22,00	27,20	FAa	1,42	33,52	11,24	44,76	0,11
5 - 20	16,59	12,80	49,33	37,87	FAL	1,48	39,14	7,85	46,98	0,10	12,63	55,87	14,93	29,20	FAa	1,53	35,56	10,50	46,06	0,98
20 - 40	9,36	12,80	48,00	39,20	FAL	1,60	34,70	9,29	43,99	0,02	5,63	58,80	12,00	29,20	FAa	1,52	23,38	14,60	37,98	2,44
40 - 100	13,18	8,80	50,00	41,20	AL	1,66	35,22	6,55	41,77	0,25	4,17	60,80	18,00	21,20	FAa	1,64	23,79	9,42	33,21	1,18

Parcela	1										2									
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹
		mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹								
0 - 5	5,55	5,00	90,00	706,00	312,00	2185,00	169,70	1,96	0,06	8,85	5,12	24,00	108,00	1016,00	480,00	2730,00	245,60	2,66	0,12	20,35
5 - 20	5,75	2,00	50,00	739,33	263,33	1415,80	112,82	0,98	0,03	7,32	5,39	8,33	49,00	937,47	419,87	1753,29	174,38	1,56	0,09	13,97
20 - 40	6,15	2,00	36,00	854,00	282,00	880,40	89,05	0,31	0,02	7,80	6,43	4,00	36,00	1194,00	406,00	932,95	111,55	0,40	0,04	12,30
40 - 100	6,26	2,00	36,58	733,83	262,17	745,53	79,63	0,17	0,04	6,88	6,84	3,27	27,20	774,53	310,67	467,87	86,21	0,20	0,03	7,77
Parcela	3										4									
Profundidad (cm)	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	pH (1:2,5)	P	K	Ca	Mg	N	S	C total (%)	CE ds m ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹
		mg kg ⁻¹										mg kg ⁻¹								
0 - 5	6,15	25,00	87,00	1780,00	560,00	3695,50	289,85	3,68	0,11	26,05	5,16	6,00	99,00	574,00	460,00	2456,50	218,70	2,61	0,09	14,74
5 - 20	6,78	8,33	65,33	1570,00	486,67	1518,63	225,35	1,43	0,11	18,58	5,18	1,73	44,47	473,60	405,60	1389,25	168,91	1,41	0,10	11,68
20 - 40	7,20	5,00	32,00	1070,00	380,00	377,90	128,55	0,30	0,15	12,30	5,47	1,00	21,00	390,00	388,00	545,70	145,30	0,53	0,12	12,10
40 - 100	7,29	6,33	24,67	1490,00	566,67	343,70	232,42	0,22	0,40	13,13	5,33	5,00	19,00	156,00	422,00	202,10	209,55	0,17	0,44	8,21

Anexo 14. Resumen del análisis de varianza para el modelo exponencial de disminución del carbono total en el suelo para diferentes TUT, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

FV	gl	SC	CME	F	Pr > F
TUT	5	33,81	6,76	30,94	< 0,001 **
TUT * Prof	5	57,44	11,50	52,6	< 0,001 **
Error	70	15,30	0,22		

Valor de p: *** p<0,01.

Anexo 15. Grupos por análisis de conglomerados y componentes principales para variables de suelos de 0 a 5 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Criterio de clasificación	Conglomerado (n)		
	1 (7)	2 (3)	3 (10)
Componentes principales	Coordenadas del conglomerado		
CP1	-2,37	4,52	0,30
CP2	1,39	1,99	-1,57
Variable del suelo	Media del conglomerado		
Da (Mg m ⁻³)	1,42	1,46	1,50
Arena (%)	59,83	32,80	39,24
Limo (%)	21,71	38,67	34,20
Arcilla (%)	18,46	28,53	26,56
P (mg kg ⁻¹)	7,71	18,33	18,50
K (mg kg ⁻¹)	78,57	98,00	99,10
Ca (mg kg ⁻¹)	528,00	1123,33	913,80
Mg (mg kg ⁻¹)	185,43	500,00	268,20
N total (mg kg ⁻¹)	1885,29	2960,67	1802,15
S (mg kg ⁻¹)	183,13	251,38	168,02
C total (mg kg ⁻¹)	21,14	29,82	16,91
pH	5,21	5,48	6,03
CE (ds m ⁻¹)	0,08	0,11	0,05
CIC (cmol kg ⁻¹)	7,55	20,38	9,38
EPT (%)	42,30	41,57	42,07
Poros $\Theta < 15 \mu\text{m}$ (%)	24,64	37,75	29,81
Poros $\Theta > 15 \mu\text{m}$ (%)	17,62	7,17	11,28
Ks (cm h ⁻¹)	4,03	0,52	3,56

Anexo 16. Grupos por análisis de conglomerados y componentes principales para variables de suelos de 5 a 20 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Criterio de clasificación	Conglomerado (n)			
	1 (4)	2 (3)	3 (3)	4 (10)
Componentes principales	Coordenadas del conglomerado			
CP1	-3,63	4,54	-1,95	0,68
CP2	-0,08	2,38	2,35	-1,39
Variable del suelo	Media del conglomerado			
Da (Mg m ⁻³)	1,62	1,49	1,40	1,70
Arena (%)	57,50	33,96	50,67	38,45
Limo (%)	22,50	33,02	24,67	32,84
Arcilla (%)	20,00	33,02	24,67	28,71
P (mg kg ⁻¹)	5,25	6,13	4,67	12,24
K (mg kg ⁻¹)	19,50	52,93	38,00	53,24
Ca (mg kg ⁻¹)	249,50	993,69	278,67	921,93
Mg (mg kg ⁻¹)	82,50	437,38	134,00	228,21
N total (mg kg ⁻¹)	781,81	1553,72	1023,25	1130,28
S (mg kg ⁻¹)	76,41	189,55	118,02	98,14
C total (mg kg ⁻¹)	6,38	14,67	11,29	7,26
pH	5,13	5,78	4,71	6,17
CE (ds m ⁻¹)	0,03	0,10	0,05	0,04
CIC (cmol kg ⁻¹)	2,53	14,74	6,45	8,19
EPT (%)	35,23	43,61	39,87	38,98
Poros $\Theta < 15 \mu\text{m}$ (%)	22,66	35,06	23,54	28,33
Poros $\Theta > 15 \mu\text{m}$ (%)	12,57	8,56	16,33	10,65
Ks (cm h ⁻¹)	1,15	0,42	4,63	1,98

Anexo 17. Grupos por análisis de conglomerados y componentes principales para variables de suelos de 20 a 40 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Criterio de clasificación	Conglomerado (n)		
	1 (7)	2 (4)	3 (9)
Componentes principales	Coordenadas del conglomerado		
CP1	-1,04	3,57	-0,78
CP2	-2,37	0,67	1,54
Variable del suelo	Media del conglomerado		
Da (Mg m ⁻³)	1,64	1,57	1,74
Arena (%)	48,31	21,6	42,04
Limo (%)	23,57	37,05	28,11
Arcilla (%)	28,11	41,35	29,84
P (mg kg ⁻¹)	2,07	4,28	5,06
K (mg kg ⁻¹)	19,86	33,5	43,94
Ca (mg kg ⁻¹)	217,5	862,15	1072,17
Mg (mg kg ⁻¹)	161,14	356,85	254,39
N total (mg kg ⁻¹)	525,28	939,36	794,44
S (mg kg ⁻¹)	101,52	129,93	78,21
C total (mg kg ⁻¹)	3,66	4,3	2,73
pH	5,02	6,32	6,66
CE (ds m ⁻¹)	0,06	0,09	0,03
CIC (cmol kg ⁻¹)	5,52	12,3	7,5
EPT (%)	36,35	43,63	36,37
Poros $\Theta < 15 \mu\text{m}$ (%)	26,37	33,86	27,78
Poros $\Theta > 15 \mu\text{m}$ (%)	9,97	9,77	8,6
Ks (cm h ⁻¹)	1,09	0,64	1,08

Anexo 18. Grupos por análisis de conglomerados y componentes principales para variables de suelos de 40 a 100 cm de profundidad en el MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela.

Criterio de clasificación	Conglomerado (n)			
	1 (4)	2 (3)	3 (8)	4 (5)
Componentes principales	Coordenadas del conglomerado			
CP1	1,30	3,60	-1,56	-0,70
CP2	1,90	-1,68	-1,29	1,55
Variable del suelo	Media del conglomerado			
Da (Mg m ⁻³)	1,77	1,66	1,77	1,68
Arena (%)	46,20	22,71	29,87	49,35
Limo (%)	21,84	34,43	35,96	23,99
Arcilla (%)	31,97	42,84	34,17	26,67
P (mg kg ⁻¹)	1,46	3,05	5,19	2,85
K (mg kg ⁻¹)	22,54	26,00	40,86	30,56
Ca (mg kg ⁻¹)	123,34	556,22	1155,20	1327,27
Mg (mg kg ⁻¹)	211,42	382,45	388,71	328,17
N total (mg kg ⁻¹)	541,30	316,04	636,50	516,88
S (mg kg ⁻¹)	146,47	239,26	83,00	114,22
C total (mg kg ⁻¹)	2,95	3,28	1,20	1,84
pH	4,81	5,37	7,55	6,38
CE (ds m ⁻¹)	0,10	0,29	0,06	0,13
CIC (cmol kg ⁻¹)	7,16	11,87	8,79	7,54
EPT (%)	36,85	42,22	36,96	36,91
Poros $\Theta < 15 \mu\text{m}$ (%)	30,50	35,74	30,98	27,55
Poros $\Theta > 15 \mu\text{m}$ (%)	6,35	6,48	5,98	9,36
Ks (cm h ⁻¹)	0,51	0,47	0,46	1,45

Anexo 19. Parámetros y estadísticos obtenidos para la curva de lactancia de vacas mestizas del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. Período 1998-2005.

Frecuencia de medición (días)	Grupo ^a	Coeficiente ± error estándar ^b			R ²	F	Pr > F
		a	b	c			
7	1	12,31 ± 0,5355	0,1038 ± 0,0136	0,0049 ± 0,000173	0,9983	8261,81	< 0,0001
	2	9,70 ± 0,3332	0,1018 ± 0,0107	0,00473 ± 0,000135	0,9989	13409,9	< 0,0001
	3	9,10 ± 0,4420	0,0926 ± 0,0154	0,00522 ± 0,000204	0,9977	6148,32	< 0,0001
	4	5,70 ± 0,5864	0,2098 ± 0,0333	0,00790 ± 0,000487	0,9915	1550,44	< 0,0001
	5	4,70 ± 1,0319	0,2592 ± 0,0814	0,0125 ± 0,00178	0,9777	336,62	< 0,0001
14	1	12,03 ± 0,5745	0,1122 ± 0,0153	0,00496 ± 0,000210	0,9987	5106,55	< 0,0001
	2	9,56 ± 0,3577	0,1052 ± 0,0120	0,00478 ± 0,000163	0,9992	8299,78	< 0,0001
	3	8,96 ± 0,6433	0,0959 ± 0,0234	0,00526 ± 0,000336	0,9967	2047,11	< 0,0001
	4	5,83 ± 0,8212	0,2076 ± 0,0468	0,00803 ± 0,000741	0,9893	590,69	< 0,0001
	5	4,67 ± 0,8787	0,2950 ± 0,0735	0,0145 ± 0,00184	0,9893	312,03	< 0,0001
28	1	11,44 ± 0,4992	0,1262 ± 0,0146	0,00513 ± 0,000222	0,9992	3933,66	< 0,0001
	2	9,54 ± 0,4486	0,1067 ± 0,0158	0,00484 ± 0,000241	0,9990	3265,21	< 0,0001
	3	8,65 ± 0,5496	0,1136 ± 0,0219	0,00570 ± 0,000358	0,9982	1640,82	< 0,0001
	4	6,12 ± 0,9815	0,1785 ± 0,0565	0,00741 ± 0,00101	0,9903	272,97	< 0,0001
	5	4,95 ± 0,7544	0,2822 ± 0,0653	0,0145 ± 0,00188	0,9952	270,88	< 0,0001

Donde: ^a Grupos de vacas establecidos según registros diarios de producción total de leche del rebaño.

^b Basado en el modelo de Wood (1967).

Anexo 20. Valor nutritivo y digestibilidad de los forrajes y suplementos ofrecidos a bovinos de doble propósito del MF-ATS, San Javier, Yaracuy, Venezuela. 2005.

Alimento	Época	MS (%)	Valores en base seca								
			PC (%)	EB (MJ kg MS ⁻¹)	FC (%)	FDA (%)	Grasa (%)	Ceniza (%)	Ca (%)	P (%)	Dig. (%)
Pasto (PCL)	Lluviosa	28,9 ± 5,7	7,3 ± 0,1	18,0 ± 0,2	45,1 ± 0,0	47,9 ± 0,4	1,0 ± 0,0	6,2 ± 0,2	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	54,0 ± 3,4
	Seca	33,1 ± 6,5	6,8 ± 0,4	18,1 ± 0,1	15,6 ± 0,1	48,5 ± 0,1	1,2 ± 0,0	5,2 ± 0,1	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	50,7 ± 0,8
Pastos (PAD)	Lluviosa	28,5 ± 5,7	7,2 ± 0,3	17,1 ± 0,3	40,8 ± 0,5	46,0 ± 0,2	1,7 ± 0,0	10,1 ± 1,0	0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,0	60,1 ± 0,4
	Seca	28,1 ± 6,2	7,7 ± 0,1	16,5 ± 0,9	39,5 ± 0,5	47,9 ± 0,0	1,4 ± 0,0	10,5 ± 0,4	0,4 ± 0,0	0,2 ± 0,0	56,0 ± 1,7
<i>L. leucocephala</i> (forraje)	Lluviosa	29,3 ± 6,5	24,9 ± 0,4	20,7 ± 0,0	23,7 ± 0,0	30,1 ± 0,0	3,7 ± 0,0	6,9 ± 0,4	1,6 ± 0,0	0,2 ± 0,0	63,6 ± 0,4
	Seca	31,8 ± 2,1	26,7 ± 0,2	20,5 ± 0,2	20,8 ± 0,0	24,5 ± 0,4	3,4 ± 0,0	7,3 ± 0,5	1,7 ± 0,0	0,2 ± 0,0	70,0 ± 2,9
<i>G. sepium</i> (forraje)	Lluviosa	22,8 ± 4,4	25,0 ± 0,0	20,7 ± 0,1	22,7 ± 0,0	26,1 ± 0,5	3,1 ± 0,0	9,2 ± 0,7	1,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	72,7 ± 2,2
	Seca	27,0 ± 9,3	25,7 ± 0,1	21,3 ± 0,9	17,2 ± 0,0	19,8 ± 0,5	3,6 ± 0,0	10,3 ± 0,0	1,8 ± 0,0	0,2 ± 0,0	77,3 ± 4,6
Caña de azúcar: cogollo		30,2 ± 5,6	4,2 ± 0,1	18,5 ± 0,2	40,3 ± 0,1	41,9 ± 0,5	1,7 ± 0,0	4,8 ± 1,5	0,2 ± 0,1	0,1 ± 0,0	49,0 ± 2,3
Caña de azúcar: tallo		32,0 ± 1,5	1,0 ± 0,0	18,0 ± 0,0	27,8 ± 0,0	28,2 ± 0,1	0,8 ± 0,3	2,3 ± 0,1	0,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0	66,0 ± 3,4
Silaje de yuca	Seca	45,3 ± 8,7	15,5 ± 0,0	17,9 ± 0,1	18,5 ± 0,7	27,4 ± 0,1	0,8 ± 0,0	3,4 ± 0,6	0,2 ± 0,0	0,2 ± 0,0	83,9 ± 0,8
Silaje de caña de azúcar y canavalia	Lluviosa	29,4 ± 2,7	16,3 ± 0,5	18,7 ± 0,2	46,9 ± 0,0	51,9 ± 1,2	0,8 ± 0,0	5,4 ± 1,0	1,0 ± 0,0	0,2 ± 0,0	59,2 ± 0,0
Silaje de sorgo y canavalia	Lluviosa	28,2 ± 3,7	15,0 ± 0,1	17,6 ± 0,5	39,2 ± 0,1	45,2 ± 0,6	0,8 ± 0,0	10,3 ± 0,9	0,9 ± 0,0	0,3 ± 0,0	43,5 ± 1,3
Bloque multinutricional		80,9 ± 4,3	36,8 ± 0,4	12,4 ± 0,0	2,8 ± 0,0	2,2 ± 0,1	0,6 ± 0,0	25,0 ± 5,7	6,9 ± 0,9	1,3 ± 0,1	86,2 ± 5,2
Fruto de palma africana (molido)		70,6 ± 0,9	2,9 ± 0,0	31,5 ± 0,5	35,5 ± 0,1	28,3 ± 0,9	1,3 ± 0,0	2,6 ± 0,1	0,2 ± 0,0	0,1 ± 0,0	70,3 ± 3,3

Donde: MS= materia seca, PC= proteína cruda, EB= energía bruta, FC= fibra cruda, FDA= fibra detergente ácida, Dig. = digestibilidad in situ de la MS. PCL= pastura en callejones de leucaena y PAD= pastura con árboles dispersos. Valores expresados como media ± desviación estándar.