Université catholique de Louvain

Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale

---

Acumulación actual y futura del Carbono en los sistemas productivos del Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica

---

Promoteur: Christine Farcy
Co-promoteur: Mildred Jiménez

Mémoire présenté par
Melinka Nájera Gómez
en vue de l'obtention du diplôme de Master bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels

Année académique 2010/2011

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a la profesora y mi promotora, Madame Christine Farcy, por haber aceptado a guiarme en este trabajo y haberme dado la oportunidad de realizar mi proyecto de fin de carrera en Costa Rica mi segundo país de procedencia. Además de motivarme con una simple sonrisa que tanta falta me hacía.

Estoy profundamente agradecida a todo el equipo del CATIE de Costa Rica, en concreto a Mildre Jiménez, Miguel Cifuentes y Diego Tobar, que aceptaron a recibirme, me proporcionaron un trabajo y me ayudaron durante todo el desarrollo de éste. Igualmente, agradecerles su paciencia y comprensión, ya que al ser la primera vez que realizo un trabajo de este tipo, han sido innumerables las preguntas y dudas que me han surgido durante todo el proceso de la realización del mismo.

Igualmente aquellos que me ayudaron a realizar mi trabajo de campo, Ventura Gamboa y Luis Quiros y a los que no, como Ney Rios y Elena de Andrés que me ayudaron muchos con mis numerosas dudas con el SIG.

Por otro lado, quería agradecerle a Monsieur Charles Bielders que gracias a la oportunidad que me dio he podido terminar lo que había venido hacer a Bélgica, a pesar de los pequeños tropezones!

Y por último, pero por supuesto no menos importante, tengo que agradecerles a todos mis amigos, viejos y nuevos y a mi familia (a mis exponsors!) que me han soportada mis buenos y no tan buenos días, pero sobretodo a mi asistente personal, choffer, personal coach y corrector de todos mis trabajos, al que le debo la mitad de mi master en Lovaina, a ti Sachirula!

Nájera M., 2011. Acumulación de carbono actual y futura en los sistemas productivos del Corredor Biológico Volcánica Central- Talamanca, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Belgique. 100 p.

Palabras claves: biomasa aérea, carbono, bosque primario, bosque secundario, pastos, cambios de uso de suelo, corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica.

RESUMEN

Los mecanismos financieros de reducción de gases de efecto invernadero (GEI), están ganando importancia en la lucha contra el cambio climático. Los Pagos por Servicio Ambiental (PSA) forman parte de estos mecanismos reconociendo la capacidad de los ecosistemas de acumular carbono atmosférico como servicio ecosistémico. El presente estudio estima el acúmulo actual de carbono y su remoción futura por los sistemas productivos en el "Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica". La acumulación de carbono en la biomasa aérea se estimó: 1) en bosques, a partir del d.a.p. de 5369 pies repartidos en 7 estratos sobre el gradiente de altitud, mediante ecuaciones alométricas; 2) en pastos mediante el método de doble muestreo (botanal), en 14 potreros repartidos en dos estratos de altitud sesgados por la cota de 700 m.s.n.m. Adicionalmente se estimó la disminución de la cobertura arbórea actual y futura bajo la propuesta de diferentes cambios de uso del suelo, enfocados en tres escenarios: restauración de los corredores riberanos, manejo sostenible de la tierra y conectividad biológica.

En los bosques primarios se detectaron como promedio 136,84 ± 49,61 Mg de $C.ha^{-1}$ y 89,30 ± 40,72 Mg de $C.ha^{-1}$ en los secundarios. Las pasturas por encima de 700 m.s.n.m. acumulan un 31 % menos, 3,06 ± 2,18 Mg de $C.ha^{-1}$ que las pasturas de menor altitud, con 4,43 ± 2,65 Mg de $C.ha^{-1}$, siendo las segundas dominadas por el género *Brachiaria sp.* que muestran una tasa mayor de fijación que las pasturas de Estrella y Kikuyo. Los sistemas boscosos registraron las mayores existencias de GEI, 288.265 $Mg\cdot CO_2e$, por ser el uso de la tierra de mayor extensión y potencial. Los usos actuales registraran de 3,6 a 8 millones de $Mg\cdot CO_2e$ en 5 y 10 años, mientras que con los escenarios propuestos aumentaríamos las remociones en 136.889 y 4,4 millones de $Mg\cdot CO_2e$ para el mismo periodo. Los resultados resaltan el potencial de mitigación de GEI de la zona con el fin de conseguir financiación del FONAFIFO en la implementación de PSA.

Nájera M., 2011. Present and future accumulation of carbon in production systems in the Volcánica Central-Talamanca Biological Corridor, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Belgique. 100 p.

Keywords: biomass, carbon, primary forest, secondary forest, pasture, land use changes, Central Volcanic Corridor-Talamanca, Costa Rica.

SUMMARY

The financial mechanisms to reduce GHGs, greenhouse gases, are gaining importance in the fight against climate change. The PES, Payments for Environmental Services, are part of these mechanisms, recognizing the GHG mitigation as an ecosystem service. The present study estimates the current accumulation of carbon and the future removals of production systems in the Volcánica Central-Talamanca Biological Corridor, Costa Rica". The stock of carbon in the aboveground biomass was estimated: 1) In forests, from the dbh of 5.369 trees divided into 7 stratus on the altitudinal gradient, using allometric equations; 2) In pastures by the method of double sampling (botanal) in 14 pasture fields over two stratus of altitude biased by the elevation of 700 m.a.s.l. It was also estimated the actual removal of tree cover. In the future, estimations will be based on proposals of different changes in land use, focusing on three scenarios: restoration of the riverside corridors, sustainable land management and biological connectivity.

Primary forests reported an average of 136.84 ± 49.61 Mg of C.ha-1 and secondary of 89,30 ± 40,72 Mg of C.ha^{-1}. Pastures above 700 m.a.s.l. accumulate 31% less, 3.06 ± 2.18 Mg of C.ha-1, than lower altitude pastures, with 4.43 ± 2.65 Mg of C.ha-1, being these last ones dominated by the genus *Brachiaria sp*. which has higher rate of fixation than Estrella and Kikuyo pasture. Forest systems had the highest GHG removals, 288,265 Mg · CO2e, as the land use with major extension and potential. Current land uses recorded from 3.6 to 8 million Mg · CO2e in 5 and 10 years, whereas with the proposed scenarios the removals would be increased in 136,889 and 4.4 million Mg · CO2e for the same period of time. The results highlight the potential for GHG mitigation in the area in order to get financing from the FONAFIFO in the implementation of PES.

AGRADECIMIENTOS 2

RESUMEN 3

SUMMARY 4

1. INTRODUCCIÓN 11

2. MARCO CONCEPTUAL 13

2.1. CAMBIO CLIMÁTICO 13
2.2. CICLO DEL CARBONO 13
2.3. EL CARBONO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO 15
2.4. ESTRATEGIAS CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO 16
2.5. PAGOS POR SERVICIO AMBIENTAL 19
2.6. COSTA RICA Y LOS PAGOS POR SERVICIOS AMBIENTALES 23
2.7. CORREDOR BIOLÓGICO VOLCÁNICA CENTRAL TALAMANCA (CBVC-T) 26
2.8. PRINCIPALES USOS DEL SUELO DEL CBCV-T Y SU PAPEL CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO 28
2.8.1. BOSQUES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS 29
2.8.2. SISTEMAS SILVOPASTORILES (SSP) Y SISTEMAS AGROFORESTALES (SAF) 30
2.9. PAGOS POR SERVICIO AMBIENTAL EN EL CBVC-T 32

3. OBJETIVOS 33

3.1. JUSTIFICACIÓN 33
3.2. OBJETIVOS 34
3.3. HIPÓTESIS 34
3.4. LIMITACIONES DEL ESTUDIO 34

4. MATERIALES Y MÉTODOS 37

4.1. DESCRIPCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO: 37
4.2. FASES PARA EL DESARROLLO DEL ESTUDIO. 38
4.2.1. CÁLCULO DE LA ACUMULACIÓN DE CARBONO EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DE BOSQUES Y PASTOS. 38
1.4.2.1. Bosque primario y secundario 38
1.4.2.2. Pastos 40
4.2.1.2.1. Material experimental 40
4.2.1.2.2. Métodos de estimación y análisis 47
4.2.2. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO DE USO DE LA TIERRA Y DETERMINACIÓN DE SU EFECTO EN EL ALMACENAMIENTO DE CARBONO DENTRO DEL CORREDOR. 50

5. RESULTADOS 58

5.1. CARBONO ACUMULADO EN LA BIOMASA DE LOS BOSQUES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS 58
5.2. CARBONO ACUMULADO EN LA BIOMASA AÉREA DE LAS PASTURAS 61

5.2.1. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES SOBRE EL CARBONO ACUMULADO EN LA BIOMASA AÉREA 61
1.5.2.1. Variables fisiográficas relacionadas con las existencias de carbono 63
1.5.2.2. Variables del área de estudio frente al carbono 66
1.5.2.3. Variables descriptivas del pasto frente a la acumulación de carbono en la biomasa aérea 68
1.5.2.4. Variables del ganado introducido a pastar por aparto frente a la acumulación de carbono en la biomasa aérea 70
1.5.2.5. Variables del uso de las pasturas frente a la acumulación de carbono en la biomasa aérea 71
5.3. REMOCIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) 73
5.3.1. REMOCIÓN DE GEI EN BOSQUES 73
5.3.2. REMOCIÓN DE GEI EN EL CBVC-T SIN PROYECTO 74
5.3.3. EXPECTATIVAS DE REMOCIÓN DE GEI EN EL CBVC-T BAJO ESCENARIOS DE PROYECTO 76
3.5.3.1. Escenario de restauración de corredores riberanos 76
3.5.3.2. Escenario de conectividad biológica 77
3.5.3.3. Escenario de manejo sostenible de la tierra 78

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 80

6.1. BOSQUES 80
6.2. PASTOS 82
6.3. REMOCIÓN DE CARBONO Y OTROS GASES DE EFECTO INVERNADERO ACTUAL Y FUTURA 86

7. CONCLUSIONES 89

8. DISCUSIÓN GENERAL 90

9. RECOMENDACIONES 92

10. BIBLIOGRAFIA 93

ANEXOS 102

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Número de hectáreas y/o árboles y montón en colones (500colón=1 $) por hectárea para cada una de las modalidades de PSA ……...26

Cuadro 2. Distribución de habitantes y viviendas según los cantones que integran el Corredor Biológico Volcánica Central – Talamanca ……27

Cuadro 3. Usos del suelo del CBVC-T. ……..29

Cuadro 4. Áreas potenciales para Pago de Servicios ambientales del año 1996 al 2002, en el Corredor Biológico Volcánica Central- Talamanca ……..32

Cuadro 5. Depósitos de carbono de un ecosistema……35

Cuadro 6. Ecuaciones para el cálculo de biomasa aérea total en bosques primarios y secundarios……..40

Cuadro 7. Tamaño y carga animal por hectárea de las fincas muestreadas contrastados con los datos promedios obtenidos por Casasola et al., en la zona de Santa Cruz, Turrialba en 2010……...42

Cuadro 8. Características de los potreros evaluados en CBVCT, Costa Rica…… 44

Cuadro 9. Variables independientes y dependientes del estudio……49

Cuadro 10. Cambios de usos de suelos para la restauración de las áreas riberanas……51

Cuadro 11. Cambios de usos de suelos para manejo sostenible de la tierra y conectividad biológica……53

Cuadro 12. Escenarios de conectividad biológica basados en las áreas prioritarias propuestas por Estrada (2009) ……55

Cuadro 13: Densidad de Carbono (Mg de $C \cdot ha^{-1}$) en algunos tipos de uso de la tierra del CBVC-T……...57

Cuadro 14. Carbono acumulado en la biomasa aérea en formaciones boscosas (Mg de $C.ha^{-1}$) en el Corredor Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica……..58

Cuadro 15. Comparación de todos los pares de medias de los bosques primarios por medio del análisis HSD (Honestly Significant Difference) de Tukey-Kramer ……60

Cuadro 16. Comparación de todos los pares de medias de los bosques secundarios por medio del análisis HSD de Tukey-Kramer ……60

Cuadro 17. Recopilación de las variables independientes y dependientes de las fincas evaluadas en CBVCT, Costa Rica……...62

Cuadro 18. Promedio en Mg de $C.ha^{-1}$de las distintas reservas de Carbono en la biomasa aérea según los rangos de altitud y su error estándar……..63

Cuadro 19. Carbono máximo acumulado por rotación en función de la orientación de la inclinación de los potreros……...65

Cuadro 20. Correlación entre las variables dependientes y las independientes del área del estudio……....66

Cuadro 21. Carbono fijado por el pasto según las especies…….69

Cuadro 22. Correlación entre el carbono máximo fijado, el carbono remanente y el carbono consumido con la unidad animal y la carga animal……...70

Cuadro 23. Remoción ($Mg{\cdot}CO_{2e}$) actual y futura, proyección hasta 10 años, de los usos actuales del corredor CBVC-T……75

Cuadro 24. Balance de remociones netas acumuladas ($Mg{\cdot}CO_2e$) al aumentar la cobertura arbórea en 285,12 ha de áreas riberanas en CBVC-T…….77

Cuadro25. Balance de remociones netas acumuladas ($Mg{\cdot}CO_2e$) al aumentar la conectividad biológica mediante la implementación de áreas con cultivos de café con sombra basado en las áreas prioritarias de Estrada (2009)……78

Cuadro26. Balance de remociones netas acumuladas ($Mg{\cdot}CO_2e$) al establecer medidas de manejo sostenible de la tierra en 23.150,24ha en cultivos, áreas quemadas, pastos tradicionales y cafetales……78

Cuadro27. Zonas de vida, localización y clima de los bosques muestreados……...104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reservorios de Carbono ……4

Figura 2. Ciclo del carbono ……..5

Figura 3. El Corredor Biológico Volcánica Central – Talamanca en conectividad con las reservas de biósfera Cordillera Volcánica Central y La Amista ……28

Figura 4. Mapa de ubicación de los potreros muestreados en el CVBC-T, por encima de 700 m.s.n.m y por debajo de 700 m.s.n.m ……..43

Figura 5. Ejemplo del procedimiento de extracción de las sub-muestras de uno de los niveles de disponibilidad……46

Figura 6. Acumulación promedio de carbono (Mg .ha^{-1}) en bosques primarios y secundarios en función de los niveles de altura. ……59

Figura 7. Reservorios de carbono (Mg de C.ha^{-1}) y carbono contenido en el pasto consumido (Mg de C.ha^{-1}) según los grupos de altitud en m.s.n.m……64

Figura 8. Carbono acumulado antes del paso del ganado en función de la orientación de la inclinación del potrero, entre vertiente norte y vertiente sur (las iniciales asociadas a los valores corresponden a los nombres de las fincas)……65

Figura 9. Reservas de carbono (Mg de C.ha^{-1}), carbono del pasto consumido (Mg de C.ha^{-1}) y tasa de fijación (Mg de C.ha^{-1}.día^{-1}) según las categorías de tamaño de potreros muestreados……..67

Figura 10. Reservas de carbono y carbono del pasto consumido (Mg de C.ha^{-1}) y tasa de fijación (Mg de C.ha^{-1}.día^{-1}) según las categorías de tamaño de apartos muestreado……...68

Figura 11. Carbono acumulado (Mg de C.ha^{-1}) y tasa de fijación (Mg de C.ha^{-1}.día^{-1}) según las pasturas monoespecíficas o mixtas. ……69

Figura 12. Modelo del carbono acumulado (Mg de C.ha^{-1}) en la biomasa aérea de las pasturas, repartidas entre los rangos de altitud por encima y por debajo de 700 msnm, para 25 años……70

Figura 13. Tendencia del pasto consumido (Mg·ha^{-1}) según la carga animal (Kg· ha^{-1}) y el tamaño de la finca……71

Figura 14. Pasto consumido (Mg·ha^{-1}) una vez pasado el ganado en función de la permanencia (días) de éste en el aparto y la carga animal (Kg.) y pasto antes del paso del ganado……72

Figura 15: Carbono acumulado en el pasto antes del paso del ganado en función de la rotación y permanencia media según el tamaño de las fincas. La rotación viene a ser el número de días de descanso del pasto más el número de días de permanencia del ganado en el potrero…….73

Figura 16. Remociones de CO2 por los bosques según los grupos de altitud y el área que representan en el CBVC-T……..74

Figura 17. Proporción de las remociones de CO_{2e} según los distintos usos de suelo considerados potencialmente removedores de CO_2…….76

Figura 18: Distribución de las zonas de vida del CBVC-T ..……105

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los mayores retos del siglo XXI, considerado como un problema, global y complejo, que afecta y compromete la existencia de la vida en el planeta. Los gases de efecto invernadero se originan en la naturaleza formando parte de los ciclos naturales biogeoquímicos. El cambio de uso del suelo, el consumo de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) y otras actividades ligadas al desarrollo tecnológico y económico han incrementado las concentraciones de estos gases, alterando así el sistema climático (IPCC 2007, Mora 2001). El aumento de las concentraciones de dióxido de carbono es el más perjudicial, por sus características y altas emisiones, alterando el ciclo del carbono desde el principio de la Revolución Industrial (Solomon et al. 2007 en Jobse, 2008).

En 1992, se estableció la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el fin de encontrar soluciones al calentamiento global. En 1997, con el Protocolo de Kyoto, en Japón, se reforzaron las medidas propuestas en la CMNUCC. Se desarrolló el comercio internacional de emisiones de CO_2, donde los países que ratificaron el protocolo y que se encuentran en el anexo I, deberán reducir sus emisiones en un 5% respecto del nivel del año 1990, durante el periodo 2008-2012 (Pearson et al, 2006). No fue sino hasta el 2005 que el protocolo tomó fuerza.

Entre los años 1980 y 1990, el mayor cambio de uso de la tierra fue la conversión del bosque primario tropical a pasto, contribuyendo aproximadamente en un 20% de las emisiones globales de CO_2 (Denman et *al.* 2007 en Jobse 2008). En Costa Rica el periodo de 1986- 1997 fue en el que se registraron las mayores tasas de deforestación (Sánchez-Azofeifa et *al.*, 2001).

Bajo el contexto de la CMNUCC y del Protocolo de Kyoto y el afán de conservación de la naturaleza, en 1997 nacieron los Pagos por Servicio Ambiental, en Costa Rica. Los pagos son otorgados a propietarios privados en áreas boscosas como reconocimiento a los servicios ecosistémicos que proporcionan sus tierras. Estos permiten la operación de un innovador “mercado verde”, bajo tres enfoques; el dominio de la tierra por el ser humano, focalizado en los servicios ecosistémicos y la utilización

de los innovadores mecanismos financieros (Sánchez-Azofeifa et *al.*, 2007). El PSA reconoce cuatro servicios ofrecidos por los ecosistemas, y entre ellos se encuentra la mitigación de los gases de efecto invernadero de los bosques naturales, plantaciones y recientemente los sistemas agroforestales, a partir del años 2005.

Las plantas juegan un papel muy importante dentro del ciclo del carbono, fijando el CO_2 atmosférico en su biomasa, mediante la fotosíntesis. Según el ecosistema y el tipo de planta, la tasa de fijación será diferente. Es por ello que en la presente investigación se ofrecen resultados de fijación y emisión de carbono de los principales sistemas productivos del, Corredor Biológica Volcánica Central-Talamanca (CBVC-T). Los bosques, con el mayor potencial de acumulación de carbono (Amézquita et *al.*, 2005), representan, en la zona, un 52% de la superficie del CBVC-T. En el otro extremo, aún con un bajo potencial, los sistemas pastoriles que representan un 25% de superficie, funcionan como sumideros de carbono y suponen la línea base de remociones de gases de efecto invernadero (GEI).

Este trabajo contribuye a la generación de información y conocimiento del CBVC-T. Basado en información ya existente y la generada por el estudio, se recapitalizan las existencias en carbono actuales de bosques, cafetales y pasto, como principales usos de la tierra, y se proyectan las remociones futuras. La finalidad y novedad del estudio es ofrecer el potencial global del corredor en cuanto a la mitigación de los GEI y favorecer la implementación de los PSA, escasos en la zona.

Con el fin de situar al lector en el contexto preciso del estudio, en la sección del marco conceptual se presenta una revisión de la problemática del cambio climático, el ciclo del carbono y las actuales estrategias contra el aumento del CO_2 atmosférico, profundizando sobre los PSA. En la sección de la metodología se describen los métodos utilizados para el cálculo del carbono acumulado tanto en los bosques como en los pastos. En este capítulo se encuentra también los escenarios de cambio propuestos para potenciar la conservación y buen manejo de la tierra además de la mitigación del CO_2. Los resultados del estudio se exponen en el punto 5 y la discusión de éstos en la sección siguiente. Para finalizar, en la sección 6 y 7, se exponen las conclusiones y una discusión general englobando el estudio un contexto general.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Cambio Climático

Actualmente una de las mayores preocupaciones mundiales es la problemática del cambio climático. Muchos científicos afirman que este fenómeno es dado por las emisiones antropógenas atmosféricas de los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (IPCC, 2005 y Stern, 2006).

El efecto invernadero facilita las condiciones apropiadas de temperatura y humedad para la vida en la Tierra. La radiación solar de onda corta traspasa la atmósfera y llega a la superficie terrestre, la cual refleja parte de la radiación infrarroja térmica y parte es refractada. Parte de la fracción reflejada es expulsada hacia el espacio y parte es devuelta a la Tierra por los GEI en la atmósfera. Este fenómeno permite mantener la superficie de la tierra a una temperatura media de 15,5ºC (Stern, 2006 y IPCC 2007a).

Concentraciones mayores a las de equilibrio de estos gases multiplican este fenómeno provocando un ascenso de la temperatura media de la tierra, alteraciones en los ciclos hídricos y otros efectos que comprometen la existencia de vida en el planeta. Los principales gases que provocan este efecto, según el Protocolo de Kyoto (1998), son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6). El CO_2 es el gas de mayor importancia desde el punto de vista del calentamiento global debido al volumen producido todos los años, por el aumento en su concentración atmosférica y por el tiempo de residencia del gas en la atmósfera. El 50% del calentamiento global es debido a la absorción de la radiación térmica, emitida por la superficie de la tierra, del CO_2 (Veldkamp, 1993 en Mora 2001). Con un fortalecimiento del efecto invernadero, esta proporción aumenta.

2.2. Ciclo del Carbono

Los ecosistemas terrestres juegan un papel muy importante dentro de los ciclos biogeoquímicos, como sumideros y fuentes de los distintos gases de efecto invernadero inducidos por las emisiones de las actividades del hombre. La dinámica de estos ecosistemas depende de las interacciones entres los distintos ciclos biogeoquímicos, particularmente el ciclo del carbón, el ciclo de nutrientes y él de la circulación del agua,

que se ve modificada indirectamente por el cambio climático y directamente por las acciones humanas (IPCC, 2000).

El carbono se encuentra de forma orgánica e inorgánica, notablemente en forma de CO_2, interactuando con el medio acuático, terrestre y atmosférico. El carbono orgánico se elabora a partir del CO_2 contenido en la atmósfera (0,03%) o disuelto en el agua del mar, gracias a la fotosíntesis. El carbono inorgánico es almacenado en la litosfera, a largo plazo (petróleo, hulla, gas natural, etc) y a corto plazo (humus), y en la biosfera como carbonato de calcio (Larousse, 1996). El carbono es el elemento principal para la vida en este planeta, encontrando su equilibrio en cuatro reservorios principales: el océano, representando el 92,40% del carbono total, con 139.460 $GtCO_{2\text{-}e,}$; el suelo, 6,07% donde el 3,76% corresponde a 5.688 $GtCO_{2\text{-}e}$ de orgánico y entre el 1,82% y 2,30% (2.752 $GtCO_{2\text{-}e}$ – 3.486 $GtCO_{2\text{-}e}$) de inorgánico; la atmósfera contiene solamente el 0,18 % (275.5 $GtCO_{2\text{-}e}$); y las plantas equivalente al 1,33% (2016 $GtCO_{2\text{-}e}$) (Sandoval et al 2003, IPCC 2000 en Romero 2009).

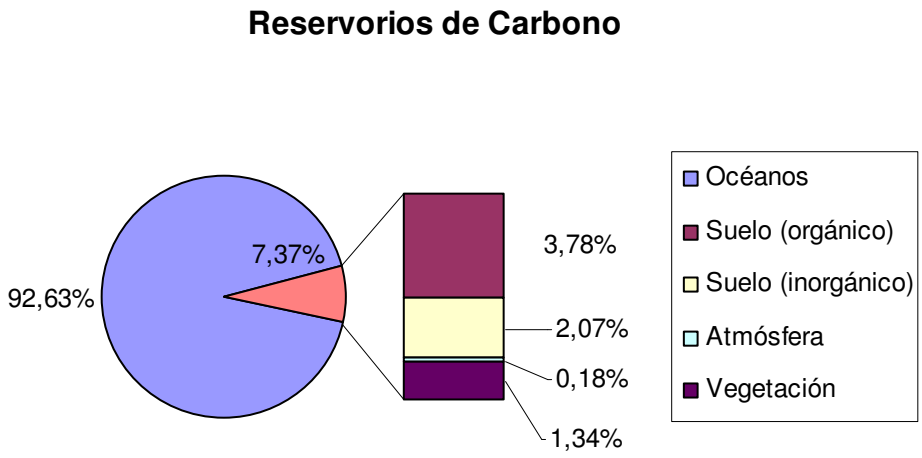

Figura 1: Reservorios de Carbono

El mayor intercambio natural del carbono y los distintos reservorios se da entre la atmósfera y la biota terrestre, siendo la productividad primaria bruta (PPB) de 120 $Gt.año^{-1}$ mediante la fotosíntesis de las plantas. Teniendo en cuenta la respiración de estas la remoción es de 60 $Gt.año^{-1}$ (productividad primaria neta, PPN). El intercambio entre el suelo y plantas con la atmósfera es regido por la fotosíntesis y la respiración, y estos contienen 3,5 veces más carbono que la atmósfera. El océano y el suelo también

actúan activamente en el intercambio de CO_2 con la atmósfera. El océano tiene 50 veces más carbono que la atmósfera, pero la nueva absorción de carbono y su translocación a depósitos más profundos es muy limitada por la lentitud del proceso (IPCC, 2000).

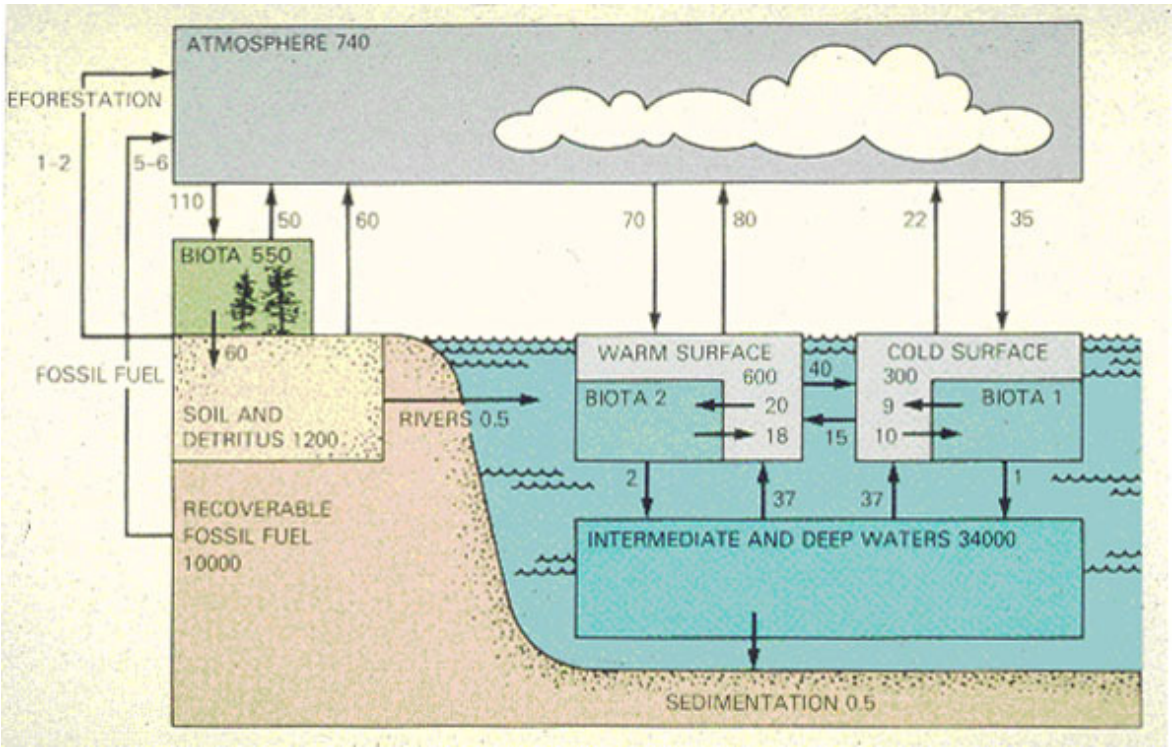

Figura 2. Ciclo del carbono1.Modelo de 7cajas del ciclo global del carbono, donde los flujos están en unidades de 10^{15} g C·año^{-1} y los reservorios en 10^{15} g C.

2.3. El carbono y el cambio climático

Las principales actividades antropogénicas que inducen al cambio climático son la deforestación y la quema de combustibles fósiles, que provienen del transporte, la industria y el sector público. La generación de energía eléctrica es la fuente más grande de emisiones de CO_2, emitiendo tanta concentración de este gas como el resto del sector industrial, mientras que el sector de transporte es la fuente de emisiones que crece más rápidamente (IPCC, 2005). Otro de los factores que influyen en el cambio climático es atribuido a los cambios de uso de suelo. Una de las mayores causas de estos cambios es la deforestación debido al aumento de la superficie para uso agrícola. A mediados del siglo XX los países de las regiones templadas, Estados Unidos y la antigua Unión Soviética sobretodo, alcanzaron la máxima extensión de superficie agrícola. Sin embargo en 1960 los países de las regiones tropicales, los países latino-americanos,

[1] Fuente: Eugen S. Takle. http://www.iitap.iastate.edu/gccourse/chem/gases/gases_lecture_es.html

superaron las extensiones de los países de las regiones templadas. Actualmente, alrededor de 13 millones de hectáreas por año se pierden por la conversión de bosques en tierras para la agricultura (FAO 2005, en Andrade et al., 2008). Durante el periodo de 1950-1998 las emisiones de CO_2 por cambio de uso de suelo fueron de 136 ± 55 Gt C (IPCC, 2000).

Desde la edad pre-industrial las actividades humanas han cambiando la composición y propiedades de la atmósfera. El CO_2 emitido a la atmosfera ha pasado de 280 ppm, alrededor del año 1750, hasta 380 ppm en la actualidad, mientras que la totalidad de gases de efecto invernadero pasaron de 290 ppm a 430 ppm (Stern, 2006). Entre 1995 y 2001 la media global de emisiones de CO_2 creció a un ritmo de 1,4% por año (IPCC, 2005). Actualmente estas emisiones siguen creciendo, llegando en 2010 al nivel más alto históricamente (30,6 Gt), habiendo superado en un 5% el record registrado en 2008. La AIE (Agencia Internacional de la Energía) advierte que las emisiones anuales de CO_2 no deben superar las 32 Gt en 2020 para evitar los peores efectos del cambio climático (Le MONDE, 2011). Si las emisiones de los GEI siguen creciendo al ritmo actual, se prevé que entre el 2030 y 2060 su concentración será el doble del nivel pre-industrial. Esto se traduce en un aumento de la temperatura global de la Tierra de 2-5ºC, lo que provocaría que una gran parte de las especies vivas no podría adaptarse al nuevo clima terrestre (Stern, 2006).

Una forma de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero es mediante la acumulación del carbono en la biomasa o en el suelo. Los árboles mediante el desarrollo de sus funciones biológicas, absorben el CO_2 atmosférico, acumulándolo en su biomasa o como materia orgánica en el suelo. De acuerdo con el *International Panel on Climate Change* (IPCC), al evitar la deforestación y aumentar la asimilación de carbono mediante la forestación, la reforestación y un manejo mejorado de los bosques, cultivos y pastizales, mitigamos las emisiones de estos gases.

2.4. Estrategias contra el cambio climático

En 1992, se estableció la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático con el fin de encontrar soluciones al calentamiento global. En 1994 la Convención fue ratificada por 189 países, la mayoría industrializados, ya que estos han sido los responsables de las mayores emisiones. El primer paso fue repartir los

países en dos Anexos, uno para los países desarrollados o en “economías de transición”, correspondientes al Anexo I, y por otra parte los países en vías de desarrollo, Anexo II. El año 1990 se tomo como año de referencia para las emisiones de CO_2 (Pearson et al, 2006).

En 1997, con el Protocolo de Kyoto, en Japón, se reforzaron las medidas propuestas en la CMNUCC. Se desarrolló el comercio internacional de emisiones de CO_2, donde los países que forman parte del protocolo y que se encuentran en el anexo I, deberán reducir sus emisiones en un 5% respecto del nivel del año de referencia, durante el periodo 2008-2012.

Las emisiones promedio de carbón global entre los años 1989 y 1998, por el consumo de combustible fósil y producción de cemento han aumentado aproximadamente en 0.8 Gt C año^{-1}. Sin embargo, hubo una disminución leve en estas emisiones de los países del Anexo I, con una disminución marcada de los países del Anexo I "con economías en la transición." Por el contrario el aumento de estas emisiones de los países en desarrollo ha sido aproximadamente 0.9 Gt C año^{-1}. Aunque la captura neta de carbono del océano parezca haber aumentado algo, la diferencia entre emisiones que resultan de la incineración de combustibles fósiles y producción de cemento, por una parte, y la recepción atmosférica y oceánica, por otra, ha aumentado. Por lo tanto, el ritmo de aumento de la reserva atmosférica de carbón ha permanecido prácticamente constante (IPCC, 2000).

Ante estos resultados, hay que aclarar que no fue sino hasta el 2005 que el protocolo tomó fuerza. Para reforzar las medidas se incluyeron 3 mecanismos flexibles para reducir el coste de la implantación del protocolo Los países tropicales, gracias a las condiciones climatológicas que les caracteriza, tienen un gran potencial en cuanto al desarrollo de la vegetación y por ello se ven vinculados estrechamente a uno de los mecanismos flexibles del protocolo. El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), (Artículo 12) consiste en la realización de proyectos en países en desarrollo, que generen un ahorro de emisiones adicional al que se hubiera producido en el supuesto de haber empleado tecnología convencional, o no haber incentivado la capacidad de absorción de las masas forestales.

Los proyectos que forman parte de los MDL se reúnen en 15 categorías, en las cuales se incluyen la reforestación y forestación, y la agricultura. Estos últimos están bajo una categoría especial del protocolo, en vez de evitar los gases invernaderos, los árboles con su crecimiento sirven como sumideros de dióxido de carbono. Los árboles pueden ser cultivados en la mayor parte de áreas del mundo, proporcionando la ventaja a la gente más pobre en las áreas más pobres. Además de secuestrar el CO_2, estos proyectos ofrecen otro tipo de beneficios como: prevención de la erosión, protección de la calidad de las aguas, realzada biodiversidad, provisión de recursos forestales para los habitantes de la zona, entre otros.

Bajo el cumplimiento del protocolo de Kyoto, existen diversos mecanismos e instrumentos tales como: mercado de carbono obligatorio o voluntario; estándar de Carbono Voluntario (VCS), Standar Gold (estándar de Oro), estándar Plan Vivo, CarbonFix Standar (CFS), los mecanismos REDD (Reducing Emission from Deforestation and forest Degradation in developing countries), el manejo forestal sostenible (MFS) y los Pagos por Servicio Ambiental (PSA), entre otros. Estos mecanismos están ligados a un mercado donde las soluciones al cambio climático quedan vinculadas a instrumentos económicos. Además de estas soluciones existen, entre otras:

Las normas de mando y control, resultan de la imposición de normas aplicadas a la gestión de los recursos naturales (Holling and Meffe, 1996). Estas normas incluyen la creación de áreas estrictamente protegidas donde se protege el recurso sin el apoyo de incentivos económicos. Son de carácter rígido e imperativo, pero éstas pueden coexistir con otras medidas, "tal es el caso del Protocolo de Kyoto que pre-condiciona los mercados de mitigación de carbono" (Wunder, 2005).

Los mercados sociales, son aquellos sistemas de reciprocidad e intercambio de favores en diferentes escalas sociales. Son sistemas tradicionales que han evolucionado localmente en el tiempo y son de carácter no monetario (Wunder, 2005).

Nueva gobernanza, la necesidad de generar sinergias y relaciones donde se refuercen los acuerdos multilaterales ambientales (AMA's) con la Organización Mundial del Comercio (OMC) con el fin de tomar responsabilidades internacionales comunes pero diferenciadas. Esto nace de la globalización y mercantilización de la naturaleza, donde

la biodiversidad se considera como un enorme banco de recursos para la nueva ecoindustria y el desarrollo sostenible se configura en el contexto de la globalización económica (Leff, 2002).

Antes de confrontar a los regímenes ambientales, que se interesan por la diversidad biológica y cultural, frente a los comerciales, basados en la homogeneización del mercado y las estrategias de la globalización económica, la tendencia se ha visto acelerada por la elaboración y aplicación de instrumentos económicos para la gestión ambiental. Estas confrontaciones son unas de las causas del retardo de los acuerdos e implementaciones de los mecanismo de gobernabilidad global, que finalmente han inclinado la balanza hacia el aspecto económico de los bienes naturales y la evaluación de los riesgos ambientales (Leff, 2002).

2.5. Pagos por servicio ambiental

"El pago por servicios ambientales (PSA) es una transacción voluntaria, donde un servicio ambiental (SA) bien definido (o un uso de la tierra que asegurare ese servicio) es "comprado", por al menos un comprador de SA, a un proveedor de SA, sólo si el proveedor asegura la provisión de éste (condicionamiento)" (Wudner, 2005) por un tiempo determinado. En otras palabras, un esquema de pago por servicios ambientales introduce un nuevo e importante principio de intercambio monetario o no monetario: cobrar por los servicios ambientales a quienes se beneficien de ellos y pagarle a quienes los producen. Esto permite la operación de un innovador "mercado verde", donde se comercializan los servicios ambientales que los ecosistemas ofrecen.

Los principales servicios ambientales reconocidos por los PSA son los siguientes:

- Secuestro y almacenamiento de carbono
- Protección de la biodiversidad
- Protección de cuencas hidrográficas
- Belleza escénica

Sin embargo, estos mecanismos no forman parte de un mercado real, donde existe la interacción competitiva entre múltiples agentes de servicios ambientales objetivamente definidos. El único de los servicios que realmente cumple con las

exigencias de un mercado, es el servicio de captura de carbono (Karsenty, 2011). Por lo que muchos de los esquemas son simplemente acuerdos bilaterales entre vendedores y compradores. La investigación de Wunder y Vargas (2005) demostró "que los mercados pueden llegar a ser ideológicamente asociados con el neoliberalismo, con lo que se crea una alienación política que va en contra de la promoción del PSA". Por lo tanto los PSA se pueden asemejar a *los impuestos y subsidios basados en el ambiente* (Wunder, 2005), donde las dos partes, vendedor y comprador, están interesados y gracias a los acuerdos bilaterales se interiorizan lo que de todas maneras sería exteriorizado (Pagiola et *al.* 2007).

Los pagos por servicios ambientales pueden dividirse en distintos tipos según las siguientes características:

Basados en áreas o productos. Los primeros corresponden a usos equiparables de la tierra y/o de los recursos para un número predeterminado de unidades de terreno. Mientras que los otros funcionan mediante el pago de un sobreprecio en la compra de productos basados en una producción certificada.

Esquemas públicos o privados. Difieren según el carácter del comprador, si es público, como el estado mediante la recaudación a partir de impuesto o donaciones, o si es privado.

Uso restringido o realce productivo. Los de uso restringido son pagados por preservar la naturaleza y por lo tanto por los costos de oportunidad, mientras que los de realce productivo buscan restaurar los servicios ambientales en un área dada, pagando así por la conservación y/o por el costo directo del establecimiento del SA (Wunder, 2005).

En algunos de los países del trópico estos mecanismos son incipientes, viéndose perjudicados por la falta de experiencia y por la poca confianza tanto de los compradores como de los proveedores de los servicios. Sin embargo estos países pueden apoyarse en la experiencias de otros tales como Costa Rica. Hoy en día la implementación ha sido aplicada a pequeña escala y para llevar su expansión mundialmente los PSA deben enfrentarse a tres retos principales:

a. La eficiencia
b. La equidad
c. El costo de oportunidad

La **eficacia** es uno de los mayores desafíos de estos mecanismos porque en muchos casos se ve bajo el punto de vista económico. A partir de una línea base, donde no existe esquema de PSA, se evalúa el efecto acumulativo que éste provoca, entonces hablamos de "adicionalidad". Si en el tiempo existe adicionalidad del SA gracias a la implementación del PSA, significa que el mecanismo es eficaz y el pago sólo se deberá hacer a aquellos propietarios que constituyen una amenaza real a la provisión de los SA.

Es aquí donde se encuentra la gran controversia: por qué pagar a aquellos propietarios que no suponen una amenaza real contra la conservación del servicio ambiental, ya que con esquema de PSA o sin él, seguirían dándole el uso del suelo buscado a su territorio, y se estaría pagando innecesariamente ese servicio. Por ejemplo ciertos propietarios de bosques que reciben pagos por el servicio de conservación por mantener sus fincas de recreo. O por el contrario, no pagar a aquellos pueblos rurales que cuidan el medio ambiente y que continuamente ofrecen SA, hasta ahora *gratuitamente* (Wunder, 2005). Por lo tanto, la "eficacia financiera" promueve que los vendedores potencialmente enemigos del medio ambiente sean aquellos que reciban el pago sin tener en cuenta la **equidad** de aquellos que ofrecen los SA, y por lo tanto no pagar "en vano" aquellos servicios que son ofrecidos sin nada a cambio hasta el momento. Esto tiende a ocurrir si el mecanismo no es autosuficiente y depende de donadores como el gobierno o fondos. Sin embargo, si el sistema está basado en el mutuo acuerdo entre compradores y vendedores la eficacia deberá estar asegurada porque los servicios que son conservados son aquellos cuyos beneficios exceden el costo de oportunidad de proveerlos.

El **costo de oportunidad**, es decir el rendimiento de usos alternativos de la tierra, es el factor discriminante que determina dónde se puede aplicar los PSA. Si el uso de la tierra es poco productivo comparado con la alternativa que el esquema de PSA propone, los pagos en este caso serían innecesarios ya que la dinámica del mercado obligaría a los productores a elegir este uso. En el caso extremo, donde el uso actual es mucho más eficaz en términos de costo que el propuesto por el esquema, el pago deberá

ser muy alto para cubrir el costo de oportunidad, y sería inviable económicamente para el mecanismo. Por lo tanto, la viabilidad de los PSA se encuentra en el rango medio de actividades marginales más rentables que el uso de la tierra deseado, donde el pago por el servicio ambiental no es excesivo (Wunder, 2005).

Otra controversia creada en torno a los PSA es aquella donde la ley de algunos países, prohíbe ciertas acciones tales como la deforestación, y por lo tanto se está complementando las leyes de débil cumplimiento por medio de los PSA, cubriendo parcialmente el costo de oportunidad que el cumplimiento de la ley implica (Wunder, 2005). Los PSA deben ser cuidadosamente enfocados para no provocar acciones contraproducentes, como las siguientes:

- Si el pago es realizado para promover el cumplimiento de la ley, esto podría atraer a la gente hacia el camino de la ilegalidad para poder recibir este pago.
- "Los premios extrínsecos pueden minar las motivaciones intrínsecas como el interés y orgullo de una comunidad por la conservación de sus bosques "(Deci et al. 1999, en Wunder, 2005). Esto se basa en la observación de ciertos estudios que dicen que las personas tienden a esforzarse más a cambio de un pago no monetario (mercado social) que cuando reciben un pago monetario (Heyman and Ariely, 2004). Por lo que hay que evitar la desmotivación de las personas al entrar en este mecanismo "mercado ambiental".

Para el buen funcionamiento de los PSA se deben tener en cuenta, como mínimo los siguientes puntos:

- Para mantener la voluntad de pago de los usuarios a largo plazo, los pagos deben ser aplicados estratégicamente en aquellos casos en que la adicionalidad pueda demostrarse claramente.
- Los pagos tienen sentido donde existe una amenaza actual o proyectada
- Los pagos son más eficientes cuando un pequeño pago a los propietarios de la tierra inclina la balanza a favor de un uso deseado de la tierra.
- El tipo de pago, monetario o en especie, debería tener una variedad de formas para satisfacer las necesidades locales.

2.6. Costa Rica y los pagos por servicios ambientales

Costa Rica es a menudo reconocido como un país modelo a seguir por los países en desarrollo en cuanto al equilibrio de la conservación de la naturaleza y el desarrollo económico (Sánchez- Azofeifa et al., 2001). Bajo la ratificación de la CMNUCC y el Protocolo de Kyoto, Costa Rica es el primer país en el que se ha implementado un programa nacional de PSA (Moreno, 2005) y uno de los países con más avances en el reconocimiento de dichos servicios ambientales (Campos *et al*., 2001).

Los PSA nacen porque antes de la década de 1950, la institucionalidad existente seguía una política en la que el bosque no era rentable como tal y promovía el cambio de uso de éste. Los propietarios de los bosques deforestaban sus terrenos para darles un "uso productivo", es decir la agricultura y la ganadería extensivas ganaban el terreno a los sistemas boscosos (Sánchez- Azofeifa et al., 2001; Moreno, 2005). "La amenaza de extinguir completamente los bosques motivó una orientación de las políticas nacionales hacia la conservación, fijando como un primer objetivo revertir el proceso de deforestación" (Moreno, 2005). Entre 1940 y 1984 Sader y Joyce (1998) estimaron que la cobertura forestal de Costa Rica disminuyo a un 50% del total de la superficie del país y que sólo el 17% del área del país estaba cubierta por bosque primario. En 1990, la organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), estimó que la tasa de deforestación entre 1976 y 1980 fue de un 3,2 % año^{-1}, situando a Costa Rica el quinto país con la mayor tasa de deforestación (Sánchez- Azofeifa et al., 2001). Además, estos cambios de usos de la tierra conllevan desequilibrios en el ecosistema e influencias negativas en territorios próximos.

Los PSA son establecidos a partir de tres leyes:

- En 1995, Ley Orgánica del Ambiente, impone "un ambiente sano y ecológicamente sano" (Ley nº 7554).
- La Ley Forestal 7575 establece un uso racional de los recursos naturales y prohíbe el cambio de uso del suelo en áreas de cobertura forestal.
- La Ley de la Biodiversidad de 1998, que promueve la conservación y el uso racional de los recursos de biodiversidad (Sánchez-Azofiefa et *al.*, 2007).

La ley Forestal 7575 de Costa Rica define los servicios ambientales como: "los que brindan los bosques y plantaciones forestales y que inciden directamente en la protección y mejoramiento del medio ambiente". Entre ellos se reconocen cuatro servicios;

- mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (fijación, reducción, secuestro, almacenamiento y absorción),
- protección del agua para uso urbano, rural o hidroeléctrico,
- protección de la biodiversidad para conservarla y uso sostenible, científico y farmacéutico, investigación y mejoramiento genético, protección de ecosistemas, formas de vida
- belleza escénica natural para fines turísticos y científicos.

El servicio brindado como mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, reconoce la capacidad de fijación y almacenamiento de carbono de los bosques naturales y plantaciones. Estos servicios se valoran de dos maneras, una que considera el precio por evitar que el carbono se libere a la atmósfera, o evitar el cambio de uso y sus emisiones potenciales, y la segunda valora la acción de remover las partículas de dióxido de carbono atmosféricas y su valor se estima a través del costo de mitigación de remover esas partículas (Ortiz et al. 1999).

El financiamiento, de los PSA, más exitoso se estructura en un fondo de financiamiento público combinado con el financiamiento privado y no-gubernamental. Además los pagos deben ser *continuos*, para que los propietarios no vuelvan a las prácticas no deseadas una vez que se acabe la subvención, y *focalizados*, ya que los servicios son particulares y localizados (Dpto. Desarrollo sostenible de la O.E.A., 2005). Para ello, en 1996, se creó el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), cuyo objetivo es financiar, para beneficio de pequeños y medianos productores, mediante créditos u otros mecanismos de fomento el manejo de bosques, reforestación, viveros forestales, sistemas agroforestales, recuperación de áreas desnudas, etc., mediante la centralización de los recursos y emisión de certificados para PSA (Ley forestal 7575, art. 46). El artículo 69 de la ley forestal indica que la principal fuente de financiamiento es Nacional, a través del impuesto selectivo al consumo de combustible y otros hidrocarburos, del cual se destina anualmente un tercio a los

programas de compensación a los propietarios de bosques y plantaciones por los servicios ambientales. Los aportes financieros procederán además de: créditos, impuestos, bonos y donaciones recibidas de organismos nacionales e internacionales (ley forestal 7575, art. 47).

Para implementar los PSA, los servicios ambientales deben ser definidos e identificados, y posteriormente evaluados para valorarlos correctamente. Las áreas prioritarias para el Pago de Servicios Ambientales (PSA), serán las establecidas mediante el Decreto Ejecutivo que emitirá el Poder Ejecutivo, en las modalidades de protección de bosque, reforestación, y sistemas agroforestales (SAF) (Moreno, 2005).

Los beneficiarios de los PSA, son aquellos propietarios de un bosque de 2 a 300 ha, en conservación, manejo y regeneración de bosque natural; y 1 ha o más para reforestación o manejo de plantaciones (Campos et al., 1999). Los sistemas agroforestales fueron reconocidos como suministradores de servicios ambientales a partir del 2003.

El pago de servicios ambientales ha involucrado a más de 22.000 pequeños y medianos productores forestales, con un área promovida de 279,000 ha de las cuales 145,000 ha corresponden a plantaciones forestales en los últimos 10 años, la mayoría en tierras degradadas por la agricultura y por la ganadería extensiva (MINAE 1999 en Canet, 2008). En 2005 el MINAE registró casi un total de 512,496 ha donde casi 452,000 ha bajo el contrato de protección de bosque, unas 29,000 ha correspondientes tanto al manejo de bosque como a la reforestación y unas 1,300 ha enfocadas a los PSA para plantaciones. Desde 1998 hasta el 2005 la mayoría de los pagos por hectárea fueron dirigidos a la protección del bosque, pasando de un 98% a un 95% respectivamente (Pagiola S. 2006), sin embargo los mayores montos monetarios fueron destinados a la reforestación (Cuadro 1).

Cuadro 1. Número de hectáreas y/o árboles y montón en colones (500colón=1 $) por hectárea para cada una de las modalidades de PSA

Años	Protección de bosque		Manejo de Bosque		Reforestación		Plantaciones establecidas		SAF	
	Ha	monto (c)/ha	ha	monto (c)/ha	ha	monto (c)/ha	ha	monto (c)/ha	árboles	monto (c)/árbol
1997	88829.8	50000	9324.5	80225	4629.4	120000				
1998	47803.8	60000	7620.4	94000	4172.5	154000	319.0	60000		
1999	55766.0	60000	5124.8	94000	3156.0	154000	724.1	60000		
2000	26583.2	66000		103000	2456.8	169000		66000		
2001	20629.0	72600	3997.0	113300	3281.0	185900		72600		
2002	21818.9	79160	1999.2	123540	1085.5	202700				
2003	63329.9	87100			3254.5	223000	326.8	87100	109419	320.0
2004	73094.0	95800	1585.0		1585.0	245000		95800	241254	352.0
2005	54000.0	42000			6000.0	269500			475000	251.6
Total	**451854.6**	**612660.0**	**29650.9**	**608065.0**	**29620.7**	**1723100.0**	**1369.9**	**441500.0**	**825673.0**	**923.6**

***Fuente**: FONAFIFO y Decreto Ejecutivo No. 32226-MINAE PSA 2005. (Moreno, 2005).*

Pero la falta de información en cuanto a la cuantificación de los servicios ambientales, del funcionamiento del mercado y del diseño y monitoreo de los sistemas de pagos es uno de los mayores obstáculos para el desarrollo de mercados de los PSA (Dpto. Desarrollo sostenible de la O.E.A., 2005). No existe una fórmula concreta para asegurar la buena implementación de los PSA y por lo tanto cada proyecto tiene que ser adaptado a las condiciones locales y características específicas.

2.7. Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca (CBVC-T)

El CBVC-T, se ubica entre la provincia de Cartago, en los cantones de Turrialba y Jiménez principalmente, y la provincia de Limón, en Siquirres y Matina, entre las coordenadas CRTM (Costa Rica Transverse Marcator) X= 517421 - 569101 Longitud y Y= 1115350 -1075990 Latitud. Consta con una superficie de 114.000 hectáreas, en la que viven 235.000 habitantes, repartidos entre los cantones de: Paraíso, Jiménez, Turrialba, Alvarado, Siquirres y Guácimo (Cuadro 2 Canet, 2008).

Cuadro 2. Distribución de habitantes y viviendas según los cantones que integran el Corredor Biológico Volcánica Central – Talamanca

Cantón	Habitantes	Viviendas
Paraíso	52393	12985
Jiménez	14046	3794
Turrialba	68510	19018
Alvarado	12290	2947
Siquirres	52409	15008
Guácimo	34879	9828
Total	234527	63580
Fuente: Censo Nacional 2000(Canet,2008)		

El capital biológico representado en el corredor es de gran importancia por su composición florística, la estructura espacial de su vegetación natural y su riqueza faunística. Existen numerosas especies endémicas, especies raras y especies registradas por primera vez para la vertiente del Caribe pero con distribución más propia de la vertiente del Pacífico. El CBCV-T forma parte de la región Atlántica, la cual tiene la mayor riqueza en aves y mamíferos de Costa Rica, con 889 especies de aves, mamíferos, reptiles y anfibios de las 1517 registradas en el país (Canet, 2008).

Por ello, entre otras, el CBVC-T forma parte de la Red Nacional de Corredores Biológicos de Costa Rica como parte del Bosque Modelo Reventazón, que surgió en 2003 a partir del proyecto Corredor Biológico Mesoamericano, iniciativa ejecutada por la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), con financiamiento asociado del Fondo Ambiental Mundial (GEF) a través de PNUD. El principal propósito es complementar los esfuerzos, que en materia de uso y conservación de la biodiversidad, se realizan en los diferentes países involucrados.

El Bosque Modelo Reventazón, consta con áreas protegidas como tierras públicas, corredores biológicos como tierras privadas y territorios indígenas como tierras comunitarias. Más ampliamente, el CBVC-T forma parte de las tierras privadas del Bosque Modelo Reventazón y tiene como iniciativa restablecer y mantener la

conectividad biológica entre las Áreas Silvestres Protegidas (ASP) de la Reserva de la Biosfera Amistad y Reserva Biosfera Cordillera Volcánica Central (Canet, 2008).

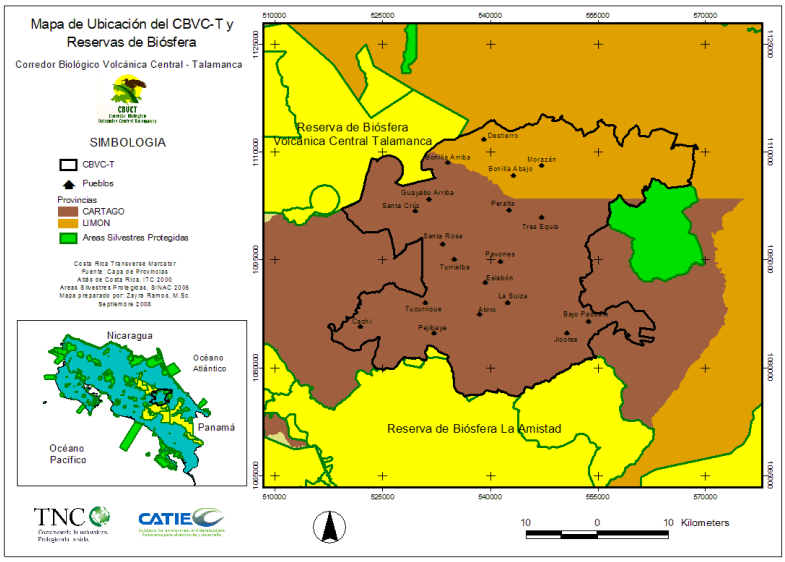

Figura 3: El Corredor Biológico Volcánica Central – Talamanca en conectividad con las reservas de biósfera Cordillera Volcánica Central y La Amistad (Canet, 2008).

Los objetivos del CBVC-T se realizan mediante plataformas de trabajo intersectorial, para la conservación de la biodiversidad y el desarrollo sostenible de los recursos naturales de dichas zonas. Las instituciones y organizadores locales se enfocan en las actividades dirigidas a hacer frente al cambio climático (empresas *carbono neutral*), manejo de residuos, diversificación de fincas, protección de áreas de recarga hídrica, reforestación, turismo comunitario y el fortalecimiento de las capacidades locales para la autogestión (Jiménez, 2009). Para ello, en el año 2000 se implementó un Plan de Manejo de la Cuenca del Río Reventazón (UMCRE) y se constituyó legalmente en 1998 la Asociación de Productores Orgánicos de Turrialba (APOT), entre otras organizaciones (Canet, 2008).

2.8. Principales usos del suelo del CBCV-T y su papel contra el cambio climático

El tipo de cobertura predominante en el CBVC-T es el bosque natural, principalmente secundario, seguido por pasto y en menor porcentaje el café, representando el 85% de la superficie del corredor. (Cuadro3; Canet 2008).

Cuadro 3. Usos del suelo del CBVC-T.

Uso del suelo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Bosque	58609,282	51,41
Pasto	28958,893	25,04
Charral	7073,222	6,02
Caña de azúcar	4832,382	4,20
Cafetales	9738,81	8,54
Asentamientos humanos	839,537	0,73
Cuerpos de agua	2111,019	1,85
Cultivos anuales y perennes	996,389	0,87
Suelo desnudo	110,854	0,09
Lotificaciones	216,435	0,18
Sarán	80,797	0,07
Plantaciones forestales	863,085	0,75
Área quemada	195,844	0,17

Fuente: Mapa de usos del suelo 2010 del CBVCT, Brenes.

2.8.1. Bosques primarios y secundarios

Los bosques tropicales están íntimamente relacionados con la dinámica del sistema climático, la composición atmosférica, y otros servicios ecosistemáticos que contribuyen al bienestar humano y a la sustentabilidad de la vida terrestre (Daily& Ehrlich 1992, Daily 1997 en Sánchez- Azofeifa, 2001). La totalidad de los bosques tropicales pueden llegar a almacenar 350 Pg de carbono en su biomasa aérea, más que cualquier otro bioma (Fischlin et al., 2007 en Mascaro, 2011).

Los bosques secundarios representan un 35 % de los bosques tropicales. En Costa Rica, 180.000 hectáreas están estimadas de ser cubiertas por bosque primario mientras que 425.000 hectáreas están bajo cobertura de bosque secundario (Cifuentes, 2008). Las funciones principales de los bosques secundarios, entre otras, son la protección del suelo frente a la degradación, mantenimiento de la biodiversidad, aumento de la calidad del agua y suministro de productos forestales. Además estos

bosques tienen un potencial de secuestro de carbono, similar a la de los bosques primarios (Cifuentes, 2008).

Datos para clasificar los bosques en el corredor son muy escasos. La dificultad de diferenciar un bosque primario y un secundario sin datos históricos impide hacer una clasificación de estos para todo el corredor, aunque se sabe que la gran mayoría de los bosques representados en el corredor son bosques secundarios.

La implementación de los PSA en el corredor son de gran importancia para promover un manejo sostenible y productivo de los bosques porque representan más de un 50% de la superficie y por el beneficio de los servicios que estos ofrecen a la población local. Sin embargo, la mayoría de los propietarios no son conscientes de estos beneficios y terminan por abandonar las tierras. Es por ello que la motivación del buen manejo de estas tierras, mediante subvenciones y pagos, es necesaria para poder aprovechar todas las oportunidades que estos sistemas ofrecen a la población local, y por qué no, a la humanidad por su labor de fundamental en la mitigación del CO_2.

2.8.2. Sistemas silvopastoriles (SSP) y Sistemas agroforestales (SAF)

La deforestación fue dejando paso a la agricultura, el uso de agroquímicos y la implementación de sistemas de producción más extensivos para cubrir la demanda alimenticia, están dejando consecuencias graves en Costa Rica. Entre ellas se remarca la degradación de pasturas y bajos niveles de producción por la sobreexplotación y por la incorporación de suelos de menor fertilidad (Andrade et al., 2008; Pezo e Ibrahim, 1996 en Mora, 2001). Es por ello que el área dedicada a los pastos permanentes está disminuyendo, 0,1%.año^{-1} (FAO 2006 en Andrade et al., 2008), dejando paso al desarrollo de los bosques secundarios por el abandono de estas tierras (Andrade et al, 2008; Neumann-Cosel, 2011). Esto no significa que las actividades agropecuarias vayan a desaparecer, sino que supondrán la migración hacia tierras más fértiles y posiblemente nuevas áreas a deforestar.

Actualmente, las actividades agropecuarias deben cumplir tres objetivos: a) responder a la competitividad, viéndose obligados a utilizar procesos productivos no sostenibles, donde el mercado no se hace cargo de esta degradación del medio y por lo

tanto permitiendo indirectamente el deterioro de éste; b) la sociedad demanda seguridad alimentaria, por lo tanto estas actividades deberán llevarse acabo en las tierras potencialmente aptas; c) las actividades agropecuarias deben cumplir con la responsabilidad ambiental, la sustentabilidad de los recursos y el medio ambiente (Espinoza et *al.,* 1999). Es por ello que los sistemas silvopastoriles (SSP) están siendo promovidos como una alternativa a la recuperación de las áreas degradadas, introduciendo pastos mejorados, por su gran adaptabilidad y productividad, además de permitir la regeneración natural de árboles.

Existen estudios sobre el papel ecológico de los árboles sobre los pastos como la mejora de la calidad del suelo y la productividad de las pasturas, restauración de los suelos de pasturas degradadas y sustentabilidad económica en estos sistemas (Ibrahim et *al.,* 1999) e incremento del potencial de captura de carbono (Andrade et al, 2008). Además el manejo con regeneración natural de especies arbóreas comerciales en pasturas representa uno de los métodos más económicos para la producción de madera en los sistemas silvopastoriles (Ibrahim et al., 1999), haciendo más competitivos estos sistemas que las pasturas tradicionales, en un 30% (Ibrahim et *al.,* 2010).

"La agroforestería es la combinación multidisciplinaria de diversas técnicas ecológicamente viables que implican el manejo de árboles o arbustos, cultivos alimenticios y/o animales en forma simultánea o secuencial, garantizando a largo plazo una productividad aceptable y aplicando practicas de manejo compatibles con las habituales de la población local" (Musálem, 2001). Los estudios de Estrada, 2009 y Salgado, 2010, muestran que los sistemas agroforestales en cafetales ofrecen servicios ambientales importantes al corredor. Entre ellos se destacan el amortiguamiento entre zonas de monocultivo y áreas protegidas, reducción de erosión y contaminación del agua por agroquímicos, zonas de conectividad de biodiversidad, sobretodo para aves, la oferta de productos maderables y no maderables y la captura de carbono por las especies arbóreas.

La adopción de estos sistemas, tanto SSP como los SAF, por los propietarios puede maximizar la producción de estos además de proporcionar aumentos sustanciales de captura de carbono y un aumento del valor de la biodiversidad. Esta práctica puede ser una de las mejores alternativas para reducir la pobreza rural (Ibrahim et *al*., 2010). Para que los productores adopten estas prácticas, estos deben ser subvencionados, ya

que los ingresos suplementarios que puede proporcionar la plantación de árboles en sus fincas, serán a largo plazo (Hall et al., 2011). Por lo que la implementación de los PSA en este sector es de gran importancia, para asegurarse la adopción generalizada de buenas prácticas (Ibrahim et *al.,* 2010).

2.9. Pagos por servicio ambiental en el CBVC-T

En la Subregión MINAE Turrialba – Jiménez, se han asignado desde 1996 hasta el 2002, 6463 ha por el concepto de Pago de Servicios Ambientales. Pero aún hace falta la inclusión de 10 416 ha, de los cuales más de un 95% deben ir dirigidos a la protección de los bosques (Cuadro 4) (Canet 2008).

Cuadro 4. Áreas potenciales para Pago de Servicios ambientales del año 1996 al 2002, en el Corredor Biológico Volcánica Central- Talamanca

Modalidad	Asignadas (ha)	Faltante (ha)
Protección de Bosques	3100	9972
Reforestación	363	338
Manejo de Bosque	--	106
Total	**3463**	**10416**

Fuente: Canet 2008

Aunque se han realizado pocos estudios hasta el momento de cómo el pago del carbono secuestrado por fincas bajo un uso de suelo silvopastoril, en un análisis *ex ante* se obtuvieron estimaciones del aumento de los ingresos. Éstos corresponden entre un 10 y un 20% más respecto de una pastura de monocultivo si éstas se transforman en sistemas silvopastoriles o en bosques secundarios (Beer et *al.* 2003).

3. OBJETIVOS

3.1. Justificación

La investigación fue realizada en el marco de trabajo colaborativo del Bosque Modelo Reventazón con el apoyo del CATIE y de la Universidad Católica de Lovaina hacia la generación de información y conocimiento para el Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, CBVCT, en Costa Rica. El trabajo se apoya en la información ya generada en la zona y su finalidad fue crear un documento que sirva al apoyo de los futuros trabajos e investigaciones.

El carbono presenta un porcentaje muy pequeño en la atmósfera, apenas un 0,03%, pero se ha demostrado que es el gas principal que provoca el efecto invernadero. Es por esto que uno de los desafíos para la mitigación de los gases de efecto invernadero es la incorporación del CO_2 en la biomasa vegetal. Sin embargo los ecosistemas no pueden fijar todo el CO_2 emitido por la actividad humana y éste será devuelto a la atmósfera tarde o temprano, es por esto que los bosques y otros ecosistemas tienen la función principal de ayudar a mitigar el problema conjuntamente con nuevas soluciones tecnológicas que reduzcan la emisión de los GEI (Montero et *al.,* 2005).

Los sistemas boscosos representan casi un 30% de la superficie de la tierra y se estima que, aproximadamente el 80% del carbono contenido en la biomasa aérea de toda la vegetación mundial y un 40% del carbono contenido en raíces, residuos y suelos se encuentran en los bosques (Hall, 1991; Dixon et *al.,* 1993 en Montero et *al.,* 2005). Sin embargo el 40-50% del territorio mundial se encuentra bajo el uso de la agricultura, del cual un 70% es usado como pasto (Smith et al. 2007 en Jobse, 2009). Por lo tanto los ecosistemas pastorales y sobre todo la conversión de bosque a pasto, son una parte significativa del ciclo del carbono global y en la estimación del flujo.

El presente estudio pretende ofrecer resultados de la fijación de carbono por los agro-ecosistemas de bosques y pastos, con el fin de proporcionar una visión clara sobre la potencialidad actual y futura del Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca en cuanto a la mitigación de gases de efecto invernadero, pero también contribuir, con una

base científica, a la posible negociación con el FONAFIFO para implementar las inversiones en pagos por servicio ambiental en la zona.

3.2. Objetivos

Objetivo General

Medir los stocks de carbono actuales en diversos agro-ecosistemas en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca y evaluar escenarios futuros de potencial de secuestro de carbono.

Objetivos específicos

Cuantificar el carbono almacenado en los bosques secundarios comprendidos en el rango de altitud de 669 mnsm y 2900 msnm.

Cuantificar el carbono almacenado en los pastos activos en el CBVC-T.

Evaluación de escenarios de cambio de uso de la tierra y determinación de su efecto en el almacenamiento de carbono dentro del corredor.

3.3. Hipótesis

En comparación con los pastos, los bosques primarios y secundarios fijan mayor cantidad de carbono en la biomasa aérea.

Existe potencial de acumulación de carbono en el CBVC-T como lucha contra el cambio climático.

3.4. Limitaciones del estudio

El área de estudio se limita al CBVC-T y concretamente a los sistemas boscosos y pastoriles. Los demás usos del suelo o han sido estudiados previamente o simplemente son más limitados, por lo que nos hemos ceñido a aquellos con mayor interés por su representación en el corredor.

Existen cinco tipos de depósito de carbono que pueden ser medidos, los cuales se describen en el siguiente cuadro (cuadro 5).

Cuadro 5. Depósitos de carbono de un ecosistema.

Tipo de Depósito		Descripción
Biomasa viva	Biomasa sobre el suelo	Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, incluyendo troncos, tocones vivos, ramas, cáscaras, semillas y hojas. Para facilitar las mediciones se evalúa por separado la biomasa aérea arbórea y la biomasa aérea no arbórea.
	Biomasa subterránea	Toda la biomasa de raíces vivas. Se excluyen raíces finas de menos de 2 mm de diámetro, porque difícilmente se distinguen de la materia orgánica del suelo.
Materia orgánica muerta	Madera muerta	Toda biomasa forestal no viva: troncos caídos, árboles muertos en pie, y tocones mayores de 10 cm de diámetro.
	Hojarasca	Toda la biomasa no viva sobre el suelo (hojas, ramas y cáscaras de frutos) en diferentes estados de descomposición. Comprende las capas de detritos y humus. Se puede establecer previamente un diámetro mínimo para diferenciar de "madera muerta" (por ejemplo, 10 cm).
Suelos	Materia orgánica del suelo	Comprende el carbono orgánico en los suelos minerales y orgánicos a una profundidad específica seleccionada por el proponente del proyecto.
		Raíces finas vivas con diámetro menor de 2 mm.

Fuente: IPCC 2005b (Rügnitz, 2009)

Debido a la necesidad de simplificación de las metodologías, por falta de tiempo y razones económicas, en los distintos sistemas productivos se considera únicamente la cuantificación del carbono en los depósitos de biomasa viva aérea, no siendo considerado el carbono contenido por la materia orgánica muerta o en el suelo. Este hecho supone una subestimación del carbono acumulado en el sistema. Para los sistemas pastoriles se está despreciando entre un 90 y un 98% del carbono acumulado en el suelo, materia orgánica del suelo y biomasa subterránea (Amézquite et *al.,* 2010). Sin embargo existen muy pocos estudios publicados sobre el carbono acumulado en la biomasa aérea en pasturas, por lo que será de gran utilidad para estimar cuanto es

capturado y cuanto carbono queda realmente en el sistema, por muy pequeño que sea su porcentaje. En cuanto a los sistemas boscosos, el porcentaje de carbono en el suelo, materia orgánica y biomasa subterránea, es de un 60% (Amézquite et *al.,* 2010), pero la complejidad del estudio de la biomasa viva subterránea nos impidió realizar su análisis en el tiempo determinado a realizar el trabajo.

Esta simplificación nos permitirá obtener la acumulación de carbono a nivel aéreo. Estos datos se utilizaron con el fin de interpolar el carbono actual acumulado a nivel aéreo en el corredor en los distintos usos de suelo. Para completar las existencias de carbono en los demás usos, se utilizarán datos ya publicados, que corresponden a la biomasa aérea en los cafetales, tercer uso más representativo del corredor.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción de área de estudio:

El estudio se realizó en el CBVCT, localizado en la provincia de Cartago (Costa Rica). Cuenta con una extensión de 114.451,46 ha y tiene un rango de altitud que va desde los 339 m en el distrito de Peralta hasta los 3340 m en el Volcán Turrialba (Canet 2008).

La topografía se caracteriza por terrenos en su mayoría fuertemente ondulados con pendientes entre 30 y 60%. El terreno con características más favorables para la agricultura (de plano a moderadamente ondulado, según el tipo de cultivo) es tan solo de alrededor del 10%. Un 17% se caracteriza por ser escapado con pendientes mayores al 60% (Canet 2008).

En general, los suelos que se encuentran son de los órdenes Entisoles, Inceptisoles y Ultisoles. Corresponden con suelos de áreas montañosas, especialmente con relieves pronunciados y fuertes pendientes. Estos suelos se han desarrollado bajo intensas precipitaciones y altas temperaturas que los han sujetado a una intensa erosión laminar de la capa fértil (Brenes et ál. 2010).

Las condiciones climáticas están influenciadas por el sistema de vientos alisios que incursionan por la Vertiente del Caribe y que aportan el total de la humedad, un 88,1% de humedad relativa, que se distribuye en toda la Cordillera Volcánica Central (Brenes et ál. 2010). En el Valle de Turrialba, la precipitación anual es de 2693,1mm. La temperatura promedio anual registrada por la estación de CATIE es de 21,8°C con máxima de 27,5°C y mínima de 18°C (Canet 2008).

En este corredor encontramos siete zonas de vida y cuatro transiciones distribuidas en cuatro pisos de altitud: Basal, Premontano, Montano bajo y Montano. Las zonas de vida más extensas corresponden con el Bosque muy húmedo Premontano (bmh-P) y el Bosque muy húmedo Montano bajo (bmh-Mb) (Canet 2008).

4.2. Fases para el desarrollo del estudio.

Este estudio está dividido en las siguientes partes,

- Cálculo de la acumulación del carbono en los sistemas productivos de bosques primarios, secundarios y pastos.

- Evaluación de escenarios de cambio de uso de la tierra y determinación de su efecto en el almacenamiento de carbono dentro del corredor.

A continuación se detalla cada una de estas.

4.2.1. Cálculo de la acumulación de carbono en los sistemas productivos de bosques y pastos.

1.4.2.1. Bosque primario y secundario

En el cálculo del carbono acumulado en los bosques se utilizaron datos de Murrieta (2006) y Bermeo (2010). La base Murrieta (2006), reúne el muestreo de 3532 pies, repartidos en 6 estratos, definidos a partir de distintas variables físico-ambientales como pendiente, suelos y zonas de vida, representando así la vegetación más predominante del corredor. El muestreo se hizo tomando en cuenta 36 parcelas temporales con dos tamaños, de 50 m x 50 m (0.25 ha) y de 20 m x 50 m (0.10 ha). Se midieron árboles con rangos de d.a.p. ≥ 20 cm y d.a.p. ≥ 10 cm respectivamente. Murrieta identificó y caracterizó cinco tipos distintos de bosque distribuidos en relación a variables fisico-ambientales (Murrieta, 2006).

Los datos de Murrieta (2010) están restringidos al rango de altitud de 669 msnm hasta los 1739 msnm. Utilizando datos de Bermeo (2010) se completó el rango de altitud de este estudio hasta los 2900 msnm.

El estudio de Bermeo (2010), dejó una base de datos que consta de 1837 pies, con las medidas de d.a.p. e identificación de las especies. Para ello se ubicaron 9

parcelas permanentes de muestreo adicional, de 50 m x 50 m, en bosques secundarios, donde se midieron toda la vegetación >10 cm de d.a.p., incluyendo árboles, palmas y helechos. Esto con el fin de contrastar tipos funcionales de plantas presentes en estos bosques dentro del gradiente de altitud que existe en el corredor.

El cálculo de biomasa aérea total fue realizado a partir de ecuaciones alométricas para cuatro grupos diferentes; árboles de bosques primarios y secundarios, palmas, lianas y lianas del género Piper (cuadro 6).

La ecuación de Chave et al. 2005 (Cuadro 6) para bosque lluvioso fue utilizada para el cálculo de biomasa de los bosques primarios y secundarios. Esta ecuación fue obtenida a partir del estudio de 2,410 árboles directamente cosechados en 27 sitios a lo largo de los bosques tropicales. Este estudio tuvo en cuenta el diámetro del tronco, la densidad específica de la madera, la altura y los tipos de bosques (seco, húmedo, lluvioso). Se usaron modelos de regresión para convertir la base de datos creada en biomasa aérea estimada y estos fueron comprobados en bosques primarios y secundarios para bosque seco, húmedo, lluvioso, de llanura, de montaña y manglares. Las sobreestimaciones quedan dentro de un rango de 0,5 a 6,5% para el promedio de error de todos los soportes (Chave et al., 2005).

El uso de la ecuación de Chave et al., 2005 requiere datos de altura de los árboles y la densidad de madera. Para ello las alturas fueron estimadas a partir de la ecuación de Hughes et *al.* (2010) para bosque lluvioso tropical. Los datos densidad de madera para cada especie se obtuvieron de la base de datos de Cifuentes (2008).

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de biomasa aérea de palmas y lianas, son específicas para la zona de vida donde se ubica el área de estudio. Las ecuaciones de Sierra et al. (2007) fueron realizadas para la zona de la cuenca del río Porce medio que se localiza en el Macizo Central Antioqueño al nordeste del departamento de Antioquia, Colombia, siendo la zona de vida de bosque húmedo tropical (bhT) (Cardona et al., 2009). El género Piper fue tratado con una ecuación específica para este género, lo que nos permitió afinar más los resultados. Esta ecuación fue desarrollada en Quitana Roo, México, con una zona de vida coincidente con la mayoritaria del corredor.

Cuadro 6. Ecuaciones para el cálculo de biomasa aérea total en bosques primarios y secundarios.

Ecuación	Componente	Tipo de vegetación	Zona	Localidad	Referencia
$AGB_{est} = \exp(-2.557 + 0.940 \times Ln(\rho D^2 H) \equiv 0.0776 \times (\rho D^2 H)^{0.940}$	Biomasa aérea total	Árboles de bosques primarios y secundarios	Bosque lluvioso	--	Chave et al., 2005
$Ln(AGB) = 0.360+1.218 \times Ln(H) + 0.325$	Biomasa aérea total	Palmas	bosque húmedo tropical	Porce, Colombia	Sierra et al., (2007)
$Ln(AGB)= 0.028+1.84 \times Ln(D) + 0.133$	Biomasa aérea total	Lianas	bosque húmedo tropical	Porce, Colombia	Sierra et al., (2007)
$Ln(AGB)= 0.3627+ 0.0322 \times Ln(D^2 H)$	Biomasa aérea total	Lianas género Piper sp.	bosque húmedo tropical	Quintana Roo, Mexico	Cairns et al., (2003)
$Y = 13.185 \times Ln(D) – 20.407$	Altura	Árboles, palmas y lianas	Bosque lluvioso	--	Hughes et *al.* (2010)

Nota: AGB= Aboveground Biomass. Unidades: ecuación de Chave et al., 2005 [Kg]; ecuaciones Sierra et al. 2007 y Carins et al., 2003[Tn]; ecuación Hughes et al., 2010 [m].

El stock de carbono (Mg de $C \cdot ha^{-1}$) se obtuvo al multiplicar la biomasa por el contenido de carbono del material vegetal obtenido en estudios previos o recomendado por el IPCC (IPCC 2003). Las existencias totales de carbono en bosque se calcularon multiplicando el área del tipo de bosque, primario o secundario, por la densidad promedio de carbono correspondiente.

1.4.2.2. Pastos

Para el cálculo de acumulación de carbono en la biomasa aérea en los sistemas pastoriles se utilizó la técnica de muestreo del botanal, detalla más adelante.

4.2.1.2.1. Material experimental

1. **Descripción de las unidades experimentales**

Como unidad experimental se utilizó un marco de 25cm x 25cm los cuales sirvieron para muestrear los distintos potreros seleccionados dentro de las fincas escogidas del corredor.

2. Criterios de selección de las fincas

Los criterios utilizados para escoger los sistemas pastoriles estudiados fueron los siguientes:

- *La localización*:

  - Fincas situadas a una altitud menor de 700 msnm, donde se encuentra al menos 35.8% de la superficie de pastoreo del corredor (aproximadamente 10367 ha).
  - Fincas situadas a mayor altitud de 700 msnm, donde encontramos el 64.2% de las pasturas con un área de 18591,6 ha.

- *Tipo de pasturas;* Se muestrearon los tres tipos de pastos mejorados más repartidos en la zona por su alta productividad.

  - Pasto Estrella (*Cynodon pletostachyus K. Schum.*) con otra variedad africana, el Kikuyo (*Pennisetum clandestinum)* para las zonas más altas de la región, concentradas en la zona de Santa Cruz y de Guayabo, a más de 700 msnm.
  - Estrella mezclada con Taner (*Brachiaria arrecta Th. Dur. & Schinz*) situado en las zonas más bajas, altitud menor de 700 msnm, cercanas a Turrialba y Pavones.
  - Pasturas con buena cobertura de las especies de interés, sin muchas malezas.

- *Manejo del sistema:*

  - Fincas productoras de leche

- Promedio de carga animal aproximados a 4,70 AU·ha^{-1} para fincas pequeñas, 3,20 AU·ha^{-1} para fincas medianas y 2,00 AU·ha^{-1} para las grandes (Casasola, 2010) (cuadro, 7).
- Pastoreo rotacional; repartición del terreno en potreros (entre 15 a 30) donde el ganado utiliza cada espacio 0,5-1 día, descansando así los potreros entre 22 y 33 días para su recuperación.

Cuadro 7. Tamaño y carga animal por hectárea de las fincas muestreadas contrastados con los datos promedios obtenidos por Casasola et al., en la zona de Santa Cruz, Turrialba en 2010.

Finca	Tamaño (ha)		Carga animal (AU/ha)	Promedio de la carga animal (AU/ha)		
				Tipo	Estudio	(Casasola et , 2011)
Carlos Gómez	Pequeñas	2,00	7,00	Pequeñas	5,17	4,70
Mauricio Vargas		1,67	4,20			
Jhon Badilla		2,00	7,00			
Eddy Campos		1,50	6,00			
Ricardo Gamboa	Medianas	7,00	3,20	Medianas	3,58	3,20
Jorge Guillén		7,00	2,42			
Pedro Casasola		4,50	3,10			
Evertilio Aguilar		4,00	5,50			
CATIE comercial	Grandes	30,00	3,50	Grandes	3,26	2,00
Diana Sainz		20,20	3,47			
Felipe Rivera		15,00	2,13			

En total se escogieron 11 fincas con un total de 14 apartos para el muestreo. 6 de estas apartos se encuentran por debajo de los 700 msnm y 8 por encima. En la figura siguiente (Figura 4), podemos observar la distribución de los puntos muestreados y el Cuadro 8 recoge las características de cada unos de ellos.

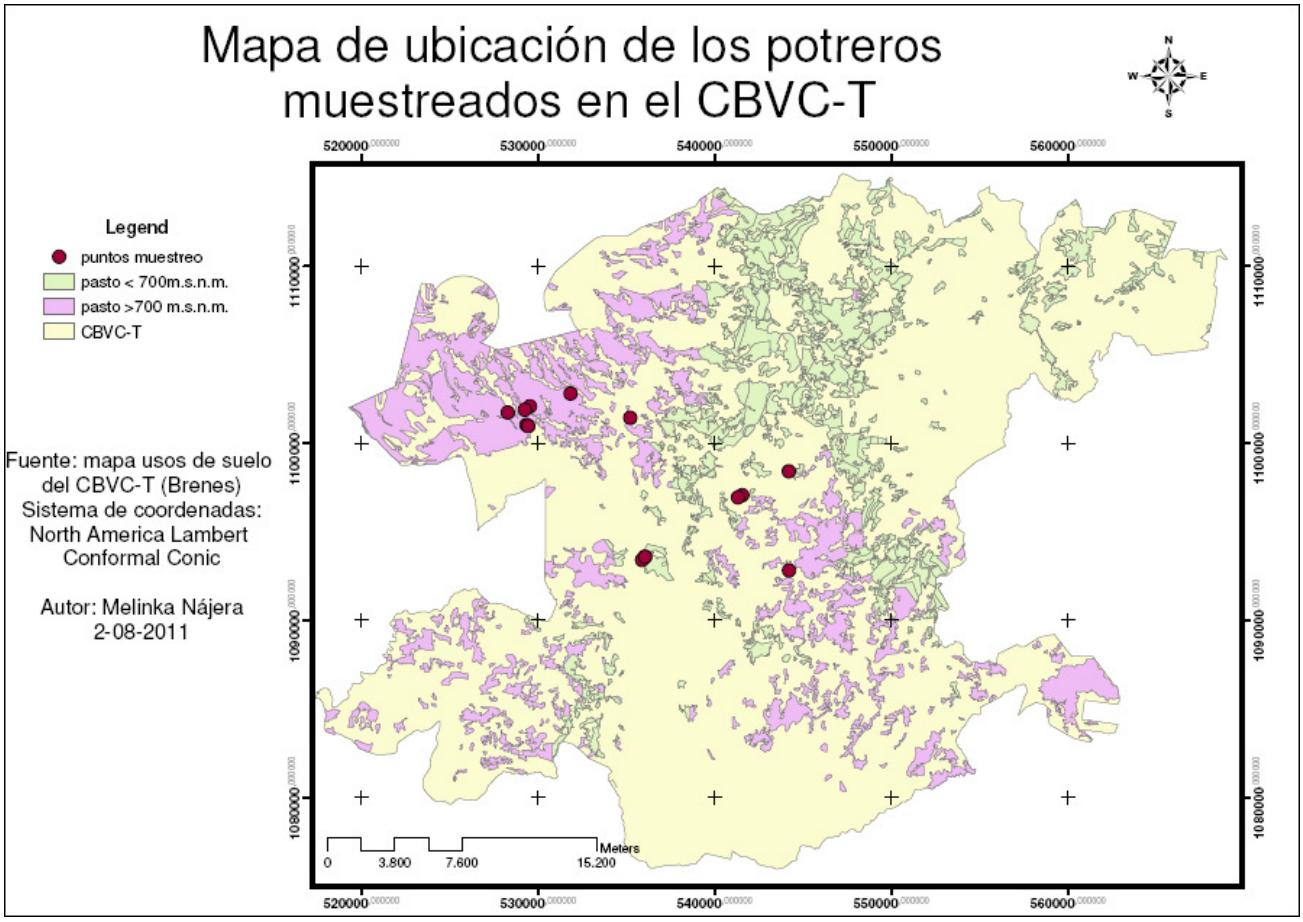

Figura 4: Mapa de ubicación de los potreros muestreados en el CVBC-T, por encima de 700 m.s.n.m y por debajo de 700 m.s.n.m.

Cuadro 8. Características de los potreros evaluados en CBVCT, Costa Rica.

Finca y potrero	Altitud (m)	área aparto muestreado (m2)	área aparto muestreado (ha)	área finca (ha)	sp. Pasto	Suelo	No. De animales / aparto	Tiempo del ganado en el aparto (horas)	Reposo (días)	Edad pasto (años)
CATIE 1	600	5000	0,500	30	Brachiaria (Tanner)	Inceptisol (tipo tropical)	105	24	26	1
CATIE 2	600	5000	0,500	30	Brachiaria (Tanner)	Inceptisol (tipo tropical)	105	24	26	15
CATIE 3	600	5000	0,500	30	Tanner + Estrella	Inceptisol (tipo tropical)	105	24	26	3
Felipe Rivera	1200	9000	0,900	15	brachiaria (decumbens)	Inceptisol (tipo tropical)	31 vascas y tres terneros	24	22	3
Carlos Gómez	1550	800	0,080	2	Estrella + Kikuyo	Inceptisol (derivados de mat. Volcánico)	14	12	33	5
Mauricio Vargas	1550	240	0,024	1,67	Estrella + Kikuyo	Inceptisol (derivados de mat. Volcánico)	7	24	27	15
Pedro Casasola	1600	1000	0,100	4,5	Estrella + Kikuyo	Inceptisol (derivados de mat. Volcánico)	14	24	33	25
Diana Sainz 1	1400	3000	0,300	20,2	Estrella	Inceptisol (derivados de mat. Volcánico)	70	12	23	17
Diana Sainz 2	1400	3000	0,300	20,2	Estrella	Inceptisol (derivados de mat. Volcánico)	70	12	23	17
Jorge Guillén	1400	1800	0,180	7	Estrella + Tanner	Inceptisol (derivados de mat. Volcánico)	17	21	30	20
Evertilio Aguilar	1000	1000	0,100	4	Tanner + Estrella	Inceptisol (derivados de mat. Volcánico)	22	24	33	6
Jhon Badilla	700	800	0,080	2	Brachiaria: Brisanta y Tanner	Inceptisol (tipo tropical)	14	24	30	3
Eddy Campos	700	850	0,085	1,5	Brachiaria: Decumbens + algo de Tanner	Inceptisol (tipo tropical)	9	24	21	1
Ricardo Gamboa	700	1000	0,100	7	Brachiaria: Brisanta y Tanner	Inceptisol (tipo tropical)	23	12	33	4

3. Método de muestreo de la biomasa aérea en pasturas

Para determinar la producción de biomasa de las pasturas evaluadas se utilizó el método de doble muestreo (botanal) realizándolo un día antes y un día después del pastoreo. Esta práctica nos permite estimar cuál es el potencial productivo de forrajes del terreno en concreto, además de estimar la presión de pastoreo que se ejerce (Tothil, 1992) muestreo combina un método destructivo y por lo tanto objetivo y otro no destructivo de carácter subjetivo. Al utilizar estos dos métodos combinamos las ventajas y minimizamos sus desventajas (Tothil, 1992).

Inicialmente se recorrió cada potrero considerando atributos de la pastura como: altura, vigor, densidad de la pastura (relación tallo – hoja) y composición de especies herbáceas. A partir de estos se definieron 5 niveles de disponibilidad o productividad de pasto.

El método destructivo constó de la cosecha de 10 muestras repartidas por pares para cada nivel. El tamaño de la muestra corresponde a la unidad experimental anteriormente definida, de donde extrajo el pasto al ras del suelo. Estas muestras son clasificadas en dos categorías, la parte que se asumió que el animal consume (hojas verdes y tallos verdes y flexibles "tiernos") y la parte no consumida la cual corresponde a tallos y hojas secas. Tras su clasificación fueron pesadas, in situ, para no perder su peso fresco. Esta clasificación permitió la homogenización de las mismas para su posterior análisis de pesado de materia seca.

El método no destructivo consta de un estudio visual donde se determinó la disponibilidad del pasto, el porcentaje de cobertura tomando en cuenta la proporción de suelo desnudo y cobertura vegetal, y el porcentaje de pasto deseado encontrado en el mismo unidad experimental (Anexo). En cada potrero se tomaron 30 unidades experimentales dispuestas al azar sobre un trazado imaginario en zig-zag de 6 diagonales.

Ante la existencia de cercas vivas o árboles dispersos en el potrero, se guardó una distancia de 3 m entre estos y el resto del pasto, para evitar la influencia de la sobra constante sobre el mismo. Además se realizó el inventario total de los árboles dispersos de dap ≥ 20 cm.

4. Fase de laboratorio

Una vez recogidas las muestras, estas fueron llevadas al laboratorio donde se procedió a la extracción de 250 gramos de cada categoría de pasto para cada nivel de disponibilidad. Las cuatro muestras destructivas de cada nivel fueron mezcladas por categorías para obtener mayor representatividad (Figura 5). La división por categorías de las mezclas fue revisada exhaustivamente ya que en el campo éste proceso no se pudo realizar con precisión.

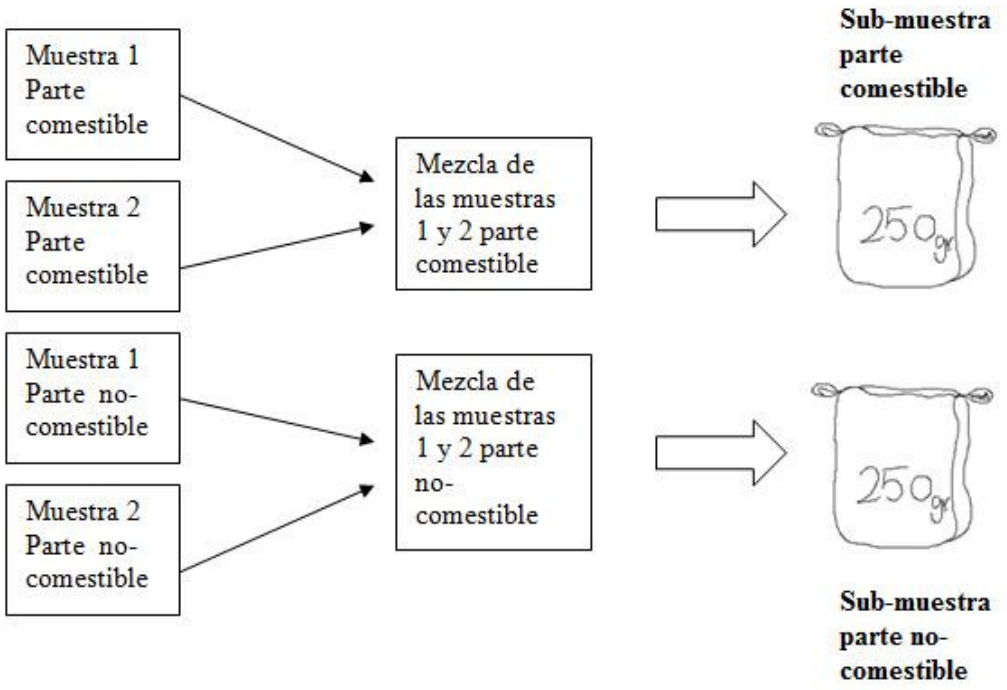

Figura 5. Ejemplo del procedimiento de extracción de las sub-muestras de uno de los niveles de disponibilidad.

Las sub-muestras fueron secadas a una temperatura constante de 65ºC durante 48 horas, en estufa de aire forzado hasta alcanzar el peso constante y con base en este valor se determinó el peso seco total de cada muestra.

4.2.1.2.2. Métodos de estimación y análisis

1. Estimación del forraje disponible

Para estimar la cantidad de forraje disponible en la pastura se hizo una regresión lineal a partir de: los pesos frescos y secos de las muestras y frecuencias de las muestras visuales.

Para ello se usó la ecuación de regresión:

$$\mathbf{Y = x + b\ (Mv - Mr)} \qquad \textbf{(}\textit{Ecuación 1)}$$

Donde:

Y= producción estimada de materia seca por 0.25 m^2

x= producción promedio en base seca de muestras reales de 1 a 5.

Mv= es el promedio de las muestras visuales (usando la escala de 1 a 5).

Mr= el promedio de los niveles en la escala real que va de 1 a 5.

b= coeficiente de regresión entre observaciones visuales y valores obtenidos para la cantidad de materia seca en las muestras reales tomadas.

2. Estimación del carbono remanente

El carbono acumulado por hectárea en los sistemas pastoriles se obtuvo a partir del forraje disponible antes del pastoreo menos la biomasa forrajera restante una vez pasado el ganado multiplicado por la fracción de carbono de la biomasa vegetal. Este coeficiente se supuso 0,5 por las siguientes razones.

- Por ser utilizado para el cálculo de carbono acumulado en los sistemas boscosos.
- Por ser utilizado en estudios anteriores (Mora, 2001; IPPC, 2003)

Por falta de medios para estimarlo mediante un análisis de cenizas de la biomasa vegetal muestreada.

3. Estimación de la carga animal

La carga animal fue recalculada a partir de la ecuación utilizada en estudios anteriores (Ibrahim, 2011). Se vio pertinente calcular la carga animal a partir de la ecuación 2, por tener más factores en cuenta, como la rotación y el número de días de reposo del potrero.

$$(CA) = \frac{(UA) * (D)}{(A) * (DPE)} \qquad (Ecuación\ 2)$$

Donde;

CA= carga animal (kg/ha)

UA = Unidad animal (kg)

D = Número de días de permanencia de los animales en el potrero o periodo de ocupación (días)

A = área del potrero (ha)

DPE = periodo de descanso + periodo de ocupación (días)

4. Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó mediante métodos no paramétricos, asumiendo que el tamaño de la muestra no es lo suficientemente grande para realizar los análisis estadísticos habituales. Para ello se utilizó el paquete estadístico Statgraphics, version 5. 1.

5. Influencia de las variables independientes sobre el carbono acumulado en la biomasa aérea

Para comparar y describir las diferencias de acumulación de carbono entre los potreros se relacionaron las variables dependientes, carbono acumulado y el carbono contenido en el pasto consumido, con las variables independientes, aquellas que describen las características de las fincas y potreros (Cuadro 9).

Cuadro 9. Variables independientes y dependientes del estudio.

Variables independientes	Fisiografía	Altitud
		Pendiente
		Orientación
	Área de estudio	Área del aparto muestreado
		Área del aparto medio
		Área de la finca
	Pasto	Especie
		Edad de la pastura
	Ganado	Unidad animal
		Carga animal
	Uso	Días de permanencia del ganado
		Días de reposo del pasto
		Rotación
Variables dependientes	Carbono	Tasa de fijación de carbono por el pasto
		Carbono máximo acumulado, carbono antes del paso del ganado
		Carbono mínimo acumulado, carbono remanente después del paso del ganado
		Carbono total consumido

6. Modelado

Se estimó la acumulación de carbono en la vida útil de una pastura con la ayuda del programa CO_2 Fix versión 3.2. Se crearon dos modelos, uno para cada rango de altitud, uno por encima de 700 m.s.n.m. (modelo 1) y otro por debajo de esta misma cota (modelo 2), y se tomaron como supuestos los siguientes:

- Tipología del pasto:
  - Modelo 1 → Mezcla de Brachiaria con Estrella.
  - Modelo 2 → Mezcla de Estrella con Kikuyo.

- Manejo de las pasturas:

    - Promedio de la rotación de 28 días
    - Tiempo de permanencia de los animales en el potrero de 1 día.
    - Promedio de la carga animal:
        - Modelo 1 → 3,9 Kg/ha
        - Modelo 2 → 4,45 Kg/ha
    - Edad máxima de la pastura de 25 años, después de ésta se supone que la pastura será remplazada por falta de productividad.
- El inicio del modelo se tomó a la edad de un año de la pastura.

4.2.2. Evaluación de escenarios de cambio de uso de la tierra y determinación de su efecto en el almacenamiento de carbono dentro del corredor.

Se desarrollaron escenarios futuros en el uso del suelo para determinar las cantidades de carbono almacenado en los próximos 20 años. Para ello nos basamos en los criterios de acciones para el manejo sostenible de tierras y la conectividad biológica del corredor, determinando así los usos de la tierra con potencial de incremento de acumulación de carbono.

1. Restauración de las zonas riberanas.

La ley forestal 7575 de Costa Rica recoge un capítulo sobre la protección forestal. En el artículo 33 se declaran como zonas de protección entre otras, aquellas zonas que se encuentran a una distancia de 15 metros en zona rural, 10 metros en zona urbana, medidas horizontalmente, en las riberas de los ríos, quebradas o arroyos. Si el terreno es quebrado la distancia será de 50 metros. Además de estas, las zonas de cincuenta metros medida horizontalmente en las riberas de los lagos y embalses naturales y en los lagos o embalses artificiales construidos por el Estado y sus instituciones (ley forestal, 7575, art. 33).

Por lo tanto, se propone que las zonas consideradas como áreas de protección, recogidas en el cuadro 10, deberán ser restauradas mediante el manejo de la regeneración natural y la plantación dirigida de especies nativas de valor ecológico, cultural o frutal.

Cuadro 10. Cambios de usos de suelos para la restauración de las áreas riberanas.

Antiguos usos de suelo	Áreas de implementación del proyecto (ha)		**Total (ha)**
	bosques	plantaciones	
Bosques	291,92	0,00	**291,92**
Pasto	0,00	113,07	**113,07**
Charral	44,82	0,00	**44,82**
Caña de azúcar	0,00	45,95	**45,95**
Café	56,71	0,00	**56,71**
Cultivos anuales/perennes	0,00	14,82	**14,82**
Plantaciones	0,95	0,00	**0,95**
Otros (suelo desnudo)	0,00	9,78	**9,78**
Total (ha)	**394,41**	**183,63**	**578,05**

La reforestación de estas zonas se ve amparada por la política forestal de reforestación costarricense que tiene por objetivos principales la recuperación de tierras de vocación forestal que se encuentran en otros usos y la producción de madera con fines comerciales para abastecer la demanda interna (Godoy et al., 1999)

El uso de plantaciones para la acumulación de carbono atmosférico se ha incrementado en la última década (Andrasko 1990, Cairns & Meganck 1994, en Shepherd, 1999) gracias a los usos múltiples que pueden proporcionar; rehabilitación de suelos, beneficios económicos directos y absorción de carbono (Shepherd, 1999), además de los beneficios socioeconómicos promovidos por incentivos a la reforestación (Godoy, 1997 y Montagnini, 2004). El mayor

beneficio de esta alternativa para la captura de carbono atmosférico se encuentra en las plantaciones mixtas, contribuyendo a disminuir los riesgos ante la inseguridad de los mercados, disminución de las incidencias y severidad de los ataques de plagas, complementar el uso de recurso del ecosistema y la posibilidad de mayor producción de biomasa que si en el mismo terreno la plantación fuese pura, dependiendo de las especies utilizadas (Shepherd, 1999).

2. Manejo sostenible de las tierras y conectividad biológica.

Este escenario consiste en la conversión de todas las zonas de pastos (28,958 ha) en sistemas silvopastoriles, la mejora de las zonas de uso agrícola hacia sistemas agroforestales (996 ha) y el aumento de cobertura arbórea en bosques secundarios y plantaciones (59,472 ha), todo esto bajo un criterio de manejo sostenible de las tierras

Para evitar los desplazamientos de las actividades humanas que estos cambios de usos de suelo producirían en el corredor, tomamos estos mismos criterios pero en las zonas prioritarias de oferta de pagos por servicio ambiental. Estas áreas fueron determinadas por Estrada (2009) a partir de los puntos calientes concernientes de conservación y conectividad de la biodiversidad y el control de la erosión en el CBVCT, con el fin de direccionar los PSE (pagos por servicio ecosistemático) a las fincas donde la oferta de esos SE se necesita críticamente (Estrada, 2009).

El Cuadro 11 muestra los cambios de usos de la tierra que se proponen bajo el escenario de aumento de la conectividad y el manejo sostenible de la tierra.

Cuadro 11. Cambios de usos de suelos para manejo sostenible de la tierra.

Antiguos usos de suelo	Áreas de implementación del proyecto (ha)					**Total (ha)**
	Bosques	Sistema silvopastoril	Café sombra	Plantaciones	SAF	
Bosques	58.317,35	0,00	0,00	0,00	0,00	**5.8317,35**
Pasto	0,00	21.606,09	0,00	0,00	0,00	**21.606,09**
Charral	7.028,39	0,00	00,00	0,00	0,00	**7.028,39**
Café	0,00	0,00	973,88	0,00	0,00	**973,88**
Cultivos anuales/perennes	0,00	0,00	0,00	0,00	981,56	**981,56**
Área quemadas	0,00	0,00	0,00	195,84	0,00	**195,84**
Total (ha)	**66.207,88**	**28.845,81**	**9.738,81**	**4.982,27**	**981,56**	**11.0756,34**

Nota: Los usos de suelo por filas corresponde a los usos de suelo actuales, por columnas corresponden a los usos de suelo futuros.

En Centro América los sistemas pastoriles son generalmente practicados en zonas frágiles, lo que se traduce en la degradación del terreno a causa del sobre-pastoreo y la compactación del suelo (Ibrahim et al. 1999). Como alternativa a estos sistemas se propuso la implementación de sistemas silvopastoriles en los pastos sin árboles del corredor.

Las principales ventajas de los sistemas silvopastoriles son;

- la regeneración natural de especies maderables como alternativa rentable económicamente para los productores (Ibrahim et al, 1999; Callo-Concha et al. 2002; Andrade et al., 2008)
- aumento del potencial de acumulación de carbono en la biomasa arbórea, sin disminuir el carbono en el suelo
- reducción de la presión sobre el carbono almacenado en los bosques, además de proporcionar un ingreso adicional al productor (Ibrahim et al., 1999 López et al.,1999)
- recuperación y fertilización de los suelos considerable, sobretodo en pasturas degradadas (Ibrahim et al., 1999 López et al.,1999)

- se destaca que las pasturas con *Brachiaria* en sistemas silvopastoriles conjunto con especies nativas mejora la productividad de los pastos (Andrade et al., 2008).

La introducción de árboles, incluso en baja densidad aumenta la proporción de carbono retenido en la biomasa arbórea y el carbono orgánico del suelo (Callo-Concha et al, 2002; Andrade et al., 2008), por lo que el cambio de pasturas a silvopasturas sería necesario en la zona, considerando las 21.606 ha.

Desde principios del siglo XVIII y a través de la historia, el café ha sido pilar fundamental de la sociedad centroamericana y ha sido considerado motor del desarrollo de la economía (ICAFE 2009). Pero en situaciones de crisis, como la de la última década causada por la sobreoferta en el mercado mundial, ha ocasionado efectos negativos por lo que se tomaron como estrategias de sobrevivencia el uso de los sistemas agroforestales con el fin de evitar el abandono de sus fincas (Castro et ál. 2004 en Salgado, 2010). Aun así estos cultivos han sufrido una regresión de 11, 912 ha en 2001 a 9738 ha en 2010 para ser remplazados por pastos (ICAFE 2005, Cerdán 2007 en Estrada 2009).

El café cultivado en sombra comparte las ventajas de los sistemas agroforestales en cuanto a la protección de los hábitats, conservación de la biodiversidad y forma parte de un soporte importante en especial en zonas donde el paisaje ha sido fuertemente fragmentado (Schroth et al. 2004). De las 9.738 ha de café que existen en el corredor, sólo 974 ha están cultivadas con cafetales sin sombra. Hemos considerado oportuno la conversión de estas zonas a cafetales con sombra y además los usos de suelo, excepto las áreas boscosas, que coincidan con las áreas prioritarias en PSA propuestas por Estrada (2009). La conversión del uso del suelo antiguo a café con sombra se recoge en el cuadro 12.

Cuadro 12. Escenarios de conectividad biológica basados en las áreas prioritarias propuestas por Estrada (2009).

	Café con sombra
Cultivos	109,57
Caña de azúcar	1.328,75
Pasto	497,56
Total	1.935,88

Nota: La primera columna corresponde a los antiguos usos de suelo y en segunda se expresa el área (ha) que serán convertidas a café con sombra.

Se permitirá que las 7073,2 ha de charral, al tratarse de zonas de regeneración de bosque secundario en tierras donde la vegetación arbórea había sido eliminada, evolucionen hacia formaciones boscosas.

Un vez establecidos los cambios de usos de suelo a realizar y con la ayuda de "Carbon Assessment Tool for Afforestation Reforestatio (CAT-AR) and for Sustainable Forest Management (CAT_SFM)" se estimaron las remociones de carbono.

La estructura general para el cálculo de remociones netas de gases de efecto invernadero por el proyecto es:

$$\mathbf{C_{neta}} = \Delta\mathbf{C_{proyecto}} - \Delta\mathbf{C_{\ linea\ base}} - \mathbf{fugas}$$ (UNFCCC 2010) donde: (ecuación 3)

$\mathbf{C_{neta}}$ son las remociones netas de GEI

$\Delta\mathbf{C_{proyecto}}$ son las remociones de GEI debidas a los sumideros implementados en el proyecto.

$\Delta\mathbf{C_{\ linea\ base}}$ son las remociones por los sumideros en la línea base (sin proyecto)

Fugas corresponden a las emisiones que se dan por el desplazamiento de actividades que producen emisiones fuera del área del proyecto.

Las herramientas digitales siguen la lógica básica descrita en la ecuación 3 calculando los incrementos en las existencias de carbono anualmente para cada tipo de cobertura considerada. Este procedimiento se repitió dos veces, una para la línea base

(sin considerar los nuevos escenarios) y otra para los cambios de uso de suelo descritos anteriormente. Se supuso que el establecimiento de los nuevos usos de tierra se basará en formas artesanales, por lo que se despreciaron las emisiones por labores de plantación. Además, como las nuevas prácticas más bien aumentan la producción en las fincas, no habría desplazamiento de actividades fuera del Corredor. Por tanto, las fugas se ignoraron en los cálculos realizados. Los nuevos escenarios se planificaron teniendo en cuenta no provocar fugas de la población hacia otras zonas, y la mayor productividad por área por el cambio de las pasturas tradicionales a sistemas silvopastoriles liberó áreas para poder implementar las intervenciones del proyecto.

Para el uso de las herramientas se tomaron los siguientes supuestos:

- El proyecto se realiza en 5 años, durante los cuales los propietarios de las áreas afectadas serían subvencionados.
- Las rotaciones son de 30 años
- Los datos de existencias y tasas de crecimiento provienen de la literatura (Cuadro 13) o determinadas durante el proyecto.

Cuadro 13: Densidad de Carbono (Mg de C·ha^{-1}) en algunos tipos de uso de la tierra del CBVC-T.

Tipo de uso	Carbono (Mg C/ha)	Incremento de carbono (Mg C/ha·año^{-1})	Fuente
Agricultura, cultivos	0.42		INAFOR (2009)
Bosque húmedo tropical	215	1	Hughes et al. (2010), Brown (1996)
Bosque húmedo tropical transición a premontano	139,5	1	Hughes et al. (2010), Brown (1996)
Bosque húmedo premontano transición a pluvial.	207	1	Hughes et al. (2010), Brown (1996)
Bosque húmedo premontano	220,6	1	Hughes et al. (2010), Brown (1996)
Bosque pluvial montano bajo	251,5	1	Hughes et al. (2010), Brown (1996)
Bosque pluvial de montano	300	1	Hughes et al. (2010), Brown (1996)
Regeneración inducida	17,6-162,17	5	Hernández y Viteri (2003), Ruiz (2002), Ibrahim et al. (2007), Cifuentes (2008)
Regeneración natural (charral, arbustales)	92,74	1,05	CABAL (2010)
Plantaciones forestales	43,73	12,39	CATIE (1991), Rojas y Ortiz (1991), Navarro y Martínez (1992), Hernández y Viteri (2003), INAFOR (2009)
Café (plantas)	21,5		Jobse (2008)
Café con sombra	9,30-60,13	1,7- 2,5	Salgado (2010), Mena (2009), Ortiz et al. (2008)
Caña de azucar	26,30		Jobse (2008)
Pasto	5,82-8,44		Este estudio
Pasto arbolado	40,19-41,85	3,10	Este estudio, Hernández y Viteri (2003), Ibrahim et al. (2007), INAFOR (2009)
SAF (con árboles dispersos)	39.00		Albrecht and Kandji (2003)
SAF (con cultivos en callejones)	21.00		Schroeder (1994)
SAF (sistemas agroforestales)	20-204	1,36	Ibrahim et al (2005), Hernández y Viteri (2003)

5. RESULTADOS

5.1. Carbono acumulado en la biomasa de los bosques primarios y secundarios

En el Cuadro 14 se presentan los valores medios de las 45 parcelas muestreadas por Murrieta y Bermeo, agrupadas por intervalos de altitud a lo largo del corredor, desde los 415 m.s.n.m. hasta 2770 m.s.n.m.

Cuadro 14. Carbono acumulado en la biomasa aérea en formaciones boscosas (Mg de C.ha^{-1}) en el Corredor Volcánica Central-Talamanca, Costa Rica.

Tipo de Bosque	Valor medio por tipo de bosque y la desviación estándar (Mg de C.ha^{-1})	Grupo de elevación (m)	Valor medio ± la desviación estándar (Mg de C.ha^{-1})	Número de parcelas
Bosque primario	136,84 ± 49,61	753-1012	80,78 ± 5,25	2
		1012-1187	154,89	1
		1187-1275	115,88 ± 67,32	2
		1275-1739	195,80 ± 12,17	2
Bosque secundario	89,30 ± 40,72	415-753	90,53 ± 20,33	5
		753-1012	44,64 ± 20,67	5
		1012-1187	42,30 ± 13,85	8
		1187-1275	87,16 ± 26,88	7
		1275-1739	86,00 ± 24,18	4
		1739-2025	108,66 ± 30,72	6
		2025-2770	165,79 ± 68,02	3

Nota: *Los promedios sin desviación estándar corresponden a datos obtenidos a partir de una sola parcela.*

La mayor acumulación de carbono se registró en los bosques primarios con un 166% más que en los secundarios. Los menores valores corresponden a los bosques secundarios para los grupos de altitud 2 y 3 (753-1012 msnm y 1012-1187 msnm, respectivamente) siendo estos entre un 25,5 – 27% menor que el valor más alto de acumulación de carbono en bosques secundarios. Para los bosques primarios el menor valor se registra también en el grupo de altitud 2, siendo un 39,5% menor que el valor

máximo del bosque primario. En la figura 6 se puede comparar los resultados obtenidos para cada tipo de bosque según los rangos de altitud.

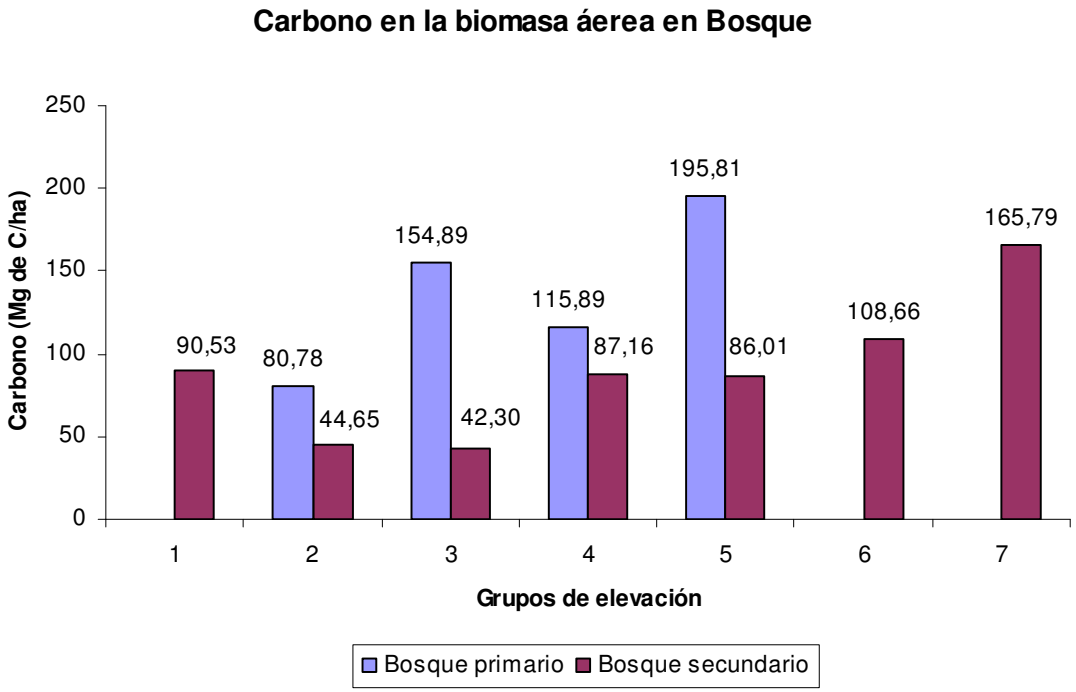

Figura 6. Acumulación promedio de carbono (Mg .ha^{-1}) en bosques primarios y secundarios en función de los niveles de altura

De este análisis podemos deducir que en bosques primarios no existen diferencias significativas entre los grupos de altitud (Cuadro 15). Sin embargo, para los bosques secundarios existen diferencias significativas entre las medias del carbono acumulado en función de los niveles de altitud. Como consecuencia de esto, el test de Tukey-Kramer separa los grupos en 3:

- Grupo A: rangos de altitud 6 y 7.
- Grupo B: rangos de altitud 1, 4 y 5.
- Grupo C: rangos de altitud 2 y 3.

El traslape entre grupos se debe a la variabilidad de los datos.

Dentro de los resultados de carbono acumulado en la biomasa aérea de bosque secundario podemos observar cierta tendencia del carbono acumulado a aumentar a

medida que ascendemos en altitud. Esto se cumple para todos los grupos excepto para el grupo de menor altitud, correspondiente al rango de 415-753 m.s.n.m.

Cuadro 15. Comparación de todos los pares de medias de los bosques primarios por medio del análisis HSD (Honestly Significant Difference) de Tukey-Kramer

Grupos	Niveles de conectividad	Media ($Mg\ .ha^{-1}$)
4	A	195,81
2	A	154,89
3	A	115,88
1	A	80,78

Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Cuadro 16. Comparación de todos los pares de medias de los bosques secundarios por medio del análisis HSD de Tukey-Kramer

Grupos	Niveles de conectividad			Media ($Mg\ .ha^{-1}$)
7	A			165,79
6	A	B		108,66
1		B	C	90,53
4		B	C	87,16
5		B	C	86,00
2			C	44,64
3			C	42,30

Nota: Los niveles no conectados por la misma letra son significativamente diferentes.

Los grupos de altitud 2 y 3 corresponden a la zona de vida bosque muy húmedo premontano. El nivel 4 corresponde al bosque pluvial premontano y el 5 al bosque pluvial montano bajo, quedando el grupo de menor altitud alejado de esta zona de vida por corresponder al bosque muy húmedo premontano. El nivel de altitud 6 corresponde a la zona de vida bosque pluvial montano bajo y el 7 al bosque pluvial montano[2].

[2] La zona de vida de los punto de muestreo fue determinada a partir del mapa de zonas de vida del CBVC-T de Canet 2008 (Figura 18) y a partir de la descripción de Hughes et *al.* 2010 (Cuadro 27). Ver anexo.

5.2. Carbono acumulado en la biomasa aérea de las pasturas

5.2.1. Influencia de las variables independientes sobre el carbono acumulado en la biomasa aérea

El cuadro 17 recoge la caracterización de las fincas según las variables independientes, además de los resultados obtenidos en cuanto a acumulación máxima de carbono por rotación, carbono remanente una vez pasado el ganado y el carbono correspondiente al pasto consumido por el ganado.

Cuadro 17. Recopilación de las variables independientes y dependientes de las fincas evaluadas en CBVCT, Costa Rica.

	Altura (m)	Pen dien te	Orien - tación	Area del aparto muestreado (ha)	área aparto medio (ha)	área finca (ha)	Tipo - logía	Edad de las pastos (años)	Unida animal (450 kg ha)	Carga animal (UN/ha)	Perma- nencia (días)	Reposo (días)	rotación (días)	Tasa de fijacion (Mg C/ha día)	C antes del paso del ganado (Mg C/ha)	C después del paso del ganado (Mg C/ha)	C total consumido (Mg C/ ha)
CATIE 1	600	1	S	0,50	0,50	30,0	1	1	105,0	7,78	1	26	27,0	0,23	6,25	3,48	2,77
CATIE 2	600	1	S	0,50	0,50	30,0	1	15	105,0	7,78	1	26	27,0	0,19	5,03	5,54	-0,51
CATIE 3	600	1	S	0,50	0,50	30,0	3	4	105,0	7,78	1	26	27,0	0,24	6,43	3,98	2,45
Jhon Badilla	700	1	NE	0,08	0,08	2,0	1	3	14,0	5,65	1	30	31,0	0,09	2,93	2,63	0,31
Eddy Campos	700	1	NE	0,09	0,06	1,5	1	1	9,0	4,81	1	21	22,0	0,17	3,74	2,89	0,85
Ricardo Gamboa	700	1	NE	0,10	0,15	7,0	1	4	23,0	3,43	0,5	33	33,5	0,07	2,20	1,39	0,80
Felipe Rivera	1200	2	SO	0,90	0,50	15,0	1	3	31,9	1,54	1	22	23,0	0,29	6,60	5,15	1,45
Carlos Gómez	1550	2	SO	0,08	0,03	2,0	4	5	14,0	2,61	0,5	33	33,5	0,10	3,44	2,43	1,01
Mauricio Vargas	1550	3	SE	0,02	0,01	1,7	4	15	7,0	10,42	1	27	28,0	0,08	2,31	0,69	1,62
Pedro Casasola	1600	2	NO	0,10	0,00	4,5	4	25	14,0	4,12	1	33	34,0	0,05	1,63	1,23	0,40
Diana Sainz 1	1400	0	ND	0,30	0,25	20,2	2	17	70,0	4,96	0,5	23	23,5	0,09	2,19	1,40	0,79
Diana Sainz 2	1400	0	ND	0,30	0,25	20,2	2	17	70,0	4,96	0,5	23	23,5	0,14	3,26	2,29	0,97
Jorge Guillén	1400	1	ND	0,18	0,12	7,0	3	20	17,0	2,68	0,875	30	30,9	0,08	2,51	2,35	0,16
Evertilio Aguilar	1000	0	ND	0,10	0,10	4,0	3	6	22,0	6,47	1	33	34,0	0,07	2,53	1,73	0,80

1.5.2.1. Variables fisiográficas relacionadas con las existencias de carbono

Se estudió la relación entre la altitud, la orientación y la pendiente del aparto con la acumulación de carbono en el pasto, mediante ecuaciones de regresión lineal y coeficientes de correlación.

Los reservorios de carbono en los pastos se clasificaron en dos grupos de altitud, por encima y por debajo de 700 m.s.n.m., por las diferencias en la tipología del pasto y las condiciones climáticas. Los valores medios según los rangos de altitud son los siguientes:

Cuadro 18. Promedio en Mg de C.ha^{-1}de las distintas reservas de Carbono en la biomasa aérea según los rangos de altitud y su error estándar.

	Promedio (Mg de C. ha^{-1})		Error Estándar	
	>700 m.s.n.m.	<700 m.s.n.m.	>700 m.s.n.m.	<700 m.s.n.m.
Carbono máximo por ciclo de rotación	3,06	4,43	0,1366	0,3625
Carbono remanente	2,16	3,32	0,2074	0,0173
Carbono del pasto consumido	0,90	1,11	9,48E-11	1,8233E-11

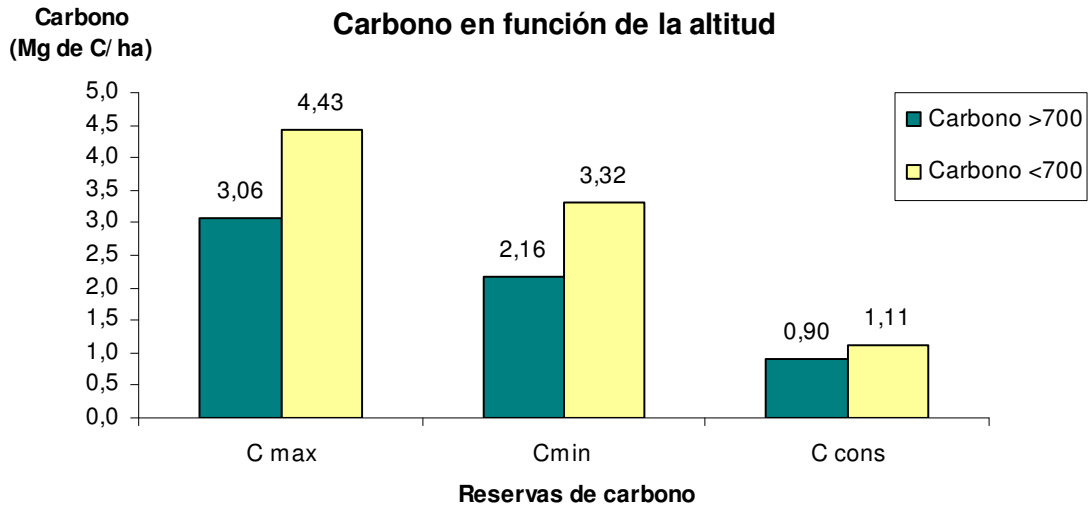

Figura 7. Reservorios de carbono (Mg de C.ha^{-1}) y carbono contenido en el pasto consumido (Mg de C.ha^{-1}) según los grupos de altitud en m.s.n.m. ***Nota:*** *C max.: carbono máximo producido en la rotación; C min.: carbono remanente; C cons.: carbono contenido en el pasto consumido.*

Se observa (Figura 7) que las reservas de carbono y el carbono del pasto consumido en las zonas bajas, cota menor a 700 msnm, son superiores que para las zonas altas. El carbono acumulado antes del paso del ganado para las zonas por debajo de 700 msnm es un 45% mayor que para las zonas altas. En cuanto al carbono remanente en las zonas bajas, es de un 53% mayor y el carbono correspondiente al pasto consumido es un 23% mayor que para las zonas altas.

En el análisis de la orientación se agruparon los rangos de altitud y a su vez se asignaron grupos de orientación entre vertiente sur o norte, representados en el cuadro 19. Se observó que las fincas con inclinaciones orientadas hacia la vertiente norte (1), presentan los valores más bajos de acumulación de carbono antes del paso del ganado en comparación con aquellos de las fincas orientadas hacia vertiente sur (3) o aquellas que no tenía inclinación alguna (2), (Figura 8).

Cuadro 19. Carbono máximo acumulado por rotación en función de la orientación de la inclinación de los potreros.

	Potreros por debajo de 700 msnm						Potreros por encima de 700 msnm							
Fincas	C 1	C 2	C 3	JB	EC	RG	FR	CG	MV	PC	DS 1	DS 2	JG	EA
Orientación	Sur	Sur	Sur	Nor-este	Nor-este	Nor-este	Sur-oeste	Sur-oeste	Sur-este	Nor-oeste	Sin orien-tación	Sin orien-tación	Sin orien-tación	Sin orien-tación
Vertiente	3	3	3	1	1	1	3	3	3	1	2	2	2	2
Carbono (Mg de C/ha)	6,25	5,03	6,43	2,93	3,74	2,20	6,60	3,44	2,31	1,63	2,19	3,26	2,51	2,53

Nota: Vertiente Sur = 3, vertiente Norte = 1, plano = 2.

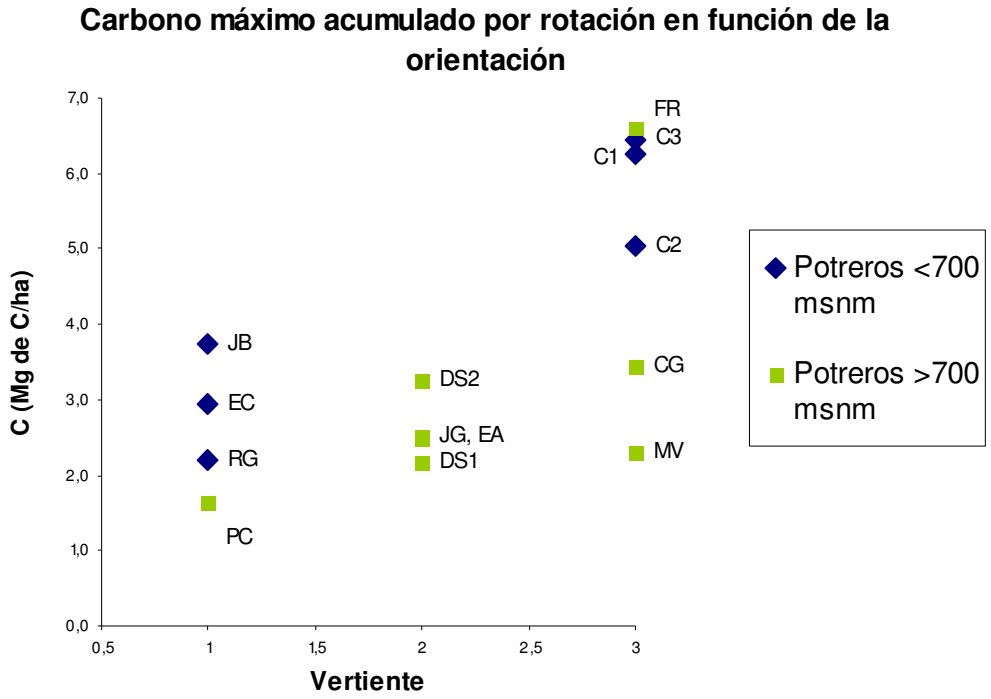

Figura 8. Carbono acumulado antes del pastoreo (Mg de C·ha^{-1}) en función de la orientación de la inclinación del potrero, entre vertiente norte y vertiente sur (las iniciales asociadas a los valores corresponden a los nombres de las fincas).

Los potreros con inclinación hacia la vertiente norte acumulan un 35%, 2,62 ± 0,91 (Mg de C.ha^{-1}) menos que los potreros con inclinación hacia la vertiente sur, siendo su promedio de 4,05 ± 1,83 (Mg de C.ha^{-1}).

1.5.2.2. Variables del área de estudio relacionadas con las existencias de carbono

El cuadro 20 recoge la relación entre el área de potreros y fincas y los reservorios de carbono, así como la tasa de fijación.

Cuadro 20. Correlación entre las variables dependientes y las independientes del área del estudio.

		Área de aparto muestreado	Área media del aparto	Área de la finca
Carbono máximo	Coef. Correlación	0,8424	0,8649	0,6829
Carbono remanente	Coef. Correlación	0,8072	0,8048	0,6099
Carbono del pasto consumido	Coef. Correlación	0,3246	0,3734	0,3374
Tasa de fijación	Coef. Correlación	0,8761	0,8506	0,6565

Nota: P-valor significativo ≤ 0,01 para un nivel de confianza del 99%.

A partir de este análisis observamos que el área del aparto muestreado y el área media de los potreros por finca y el área de la finca, mantienen una correlación alta, coeficiente de correlación ≥ 0,6 y P-valor ≥ 0,01, con el carbono máximo fijado durante la rotación, el carbono remanente y la tasa de fijación. Sin embargo esta relación no se cumple para el carbono consumido por el ganado.

Para poder comparar las áreas de los potreros muestreados, separamos las áreas en grandes, mayores de 1000 m^2, y en pequeñas, menores de 1000 m^2, obteniendo así dos grupos de 8 y 6 potreros respectivamente. Los potreros de mayor área tienen tasas de fijación mayores en un 40% que los potreros pequeños y por lo tanto tienden a acumular más carbono que éstos (Figura 9). El carbono contenido en el pasto consumido por el ganado es un 25% menor para los potreros grandes. Como consecuencia de esto y la mayor tasa de fijación, el carbono remanente en éstos mismo es un 40% mayor que para los potreros pequeños.

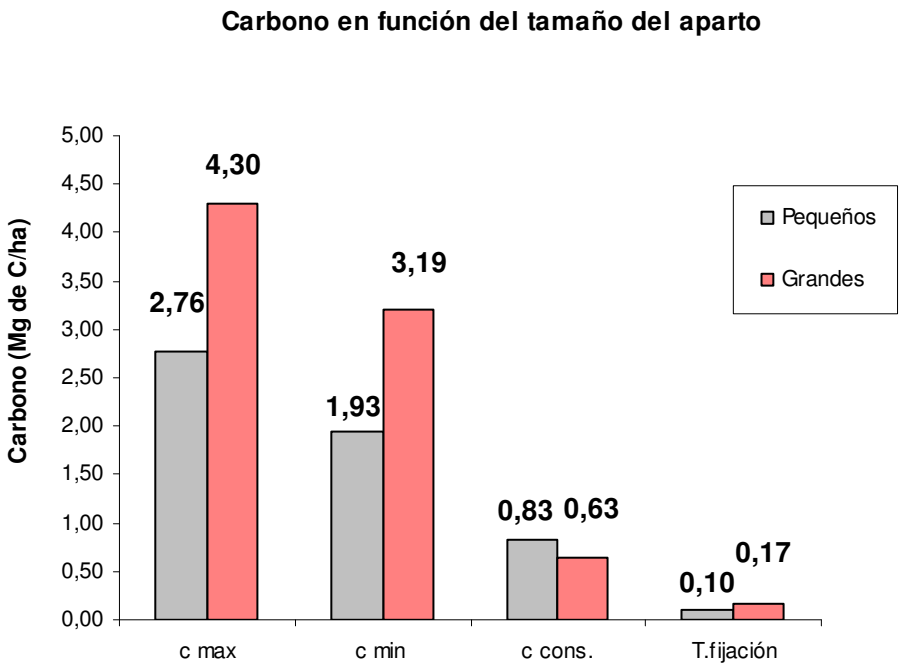

Figura 9. Reservas de carbono (Mg de C.ha^{-1}), carbono del pasto consumido (Mg de C.ha^{-1}) y tasa de fijación (Mg de C.ha^{-1}.día^{-1}) según las categorías de tamaño de potreros muestreados. ***Nota:*** *C max.: carbono máximo producido en la rotación; C min.: carbono remanente; C cons.: carbono contenido en el pasto consumido.*

En la comparación del carbono en función del tamaño de las fincas se obtuvieron los resultados que muestra el gráfico 10. Las mayores tasas de fijación se obtuvieron para las fincas de mayor tamaño, seguido de las pequeñas y por último de las medianas. Por lo tanto se remarca que el carbono máximo fijado en las fincas pequeñas es un 37% menor que las grandes y un 55% menor en las medianas. El carbono del pasto consumido sigue la misma tendencia, siendo un 28% menor en fincas pequeñas y un 60% en las medianas. Como consecuencia el carbono remanente en las fincas grandes es un 31 y 46% mayor que en las fincas pequeñas y medianas respectivamente.

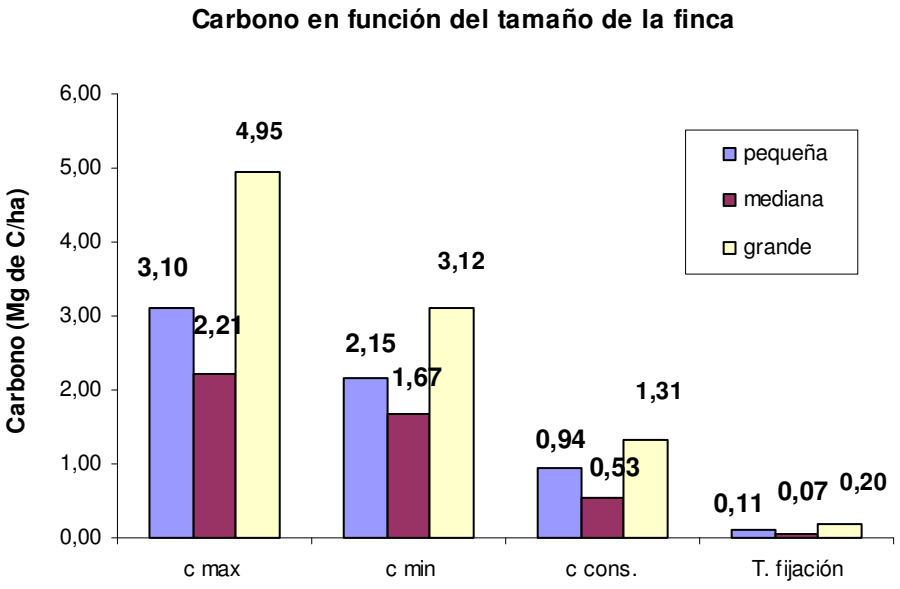

Figura 10. Reservas de carbono y carbono del pasto consumido (Mg de C·ha^{-1}) y tasa de fijación (Mg de C·ha^{-1}.día^{-1}) según las categorías de tamaño de apartos muestreado. ***Nota:*** *C max.: carbono máximo producido en la rotación; C min.: carbono remanente; C cons.: carbono contenido en el pasto consumido.*

1.5.2.3. Variables descriptivas del pasto relacionadas con las existencias de carbono

El análisis de correlación entre variables que describen el pasto resultó poco significativo (p-valor ≥ 0,01). Sin embargo al clasificar el pasto como monoespecífico, donde encontramos el género *Brachiaria* o el *Cynodon pletostachyus* solos o mixto, asociación del *Cynodon pletostachyus* con *Pennisetum clandestinum* o el género *Brachiaria sp.,* se observó mayores existencias de carbono en las pasturas monoespecíficas que en las mixtas, así como una mayor tasa de fijación (Figura 11). La tasa de fijación de carbono de los pastos monoespecíficos es un 60% mayor que para los mixtos por lo que el carbono máximo fijado es mayor en pasto monospecíficos, difiriendo en un 22% de los mixtos. Lo mismo ocurre en el reservorio de carbono de los potreros siendo para los pastos mixtos un 33% menor que para los monospecíficos.

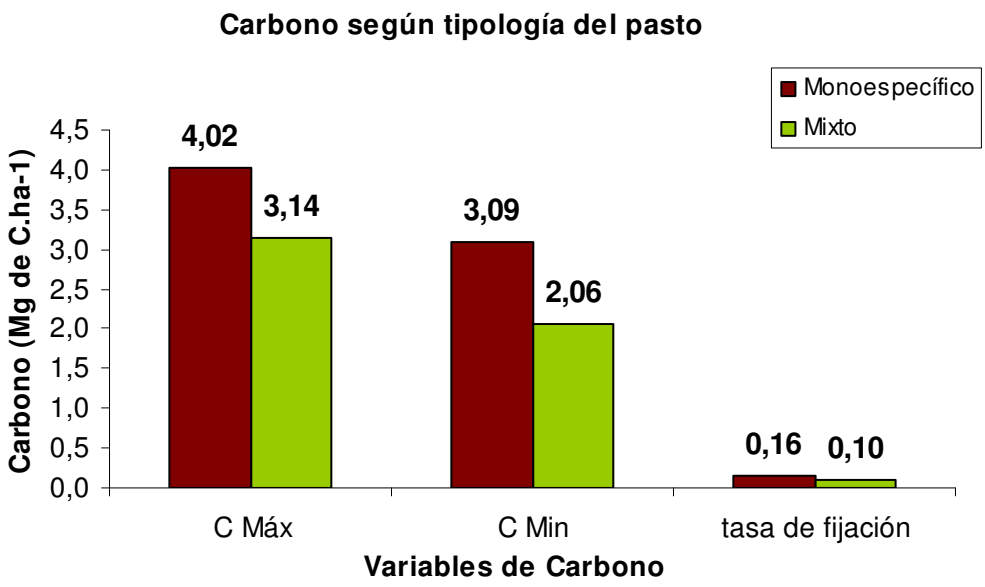

Figura 11. Carbono acumulado (Mg de C.ha^{-1}) y tasa de fijación (Mg de C.ha^{-1}.día^{-1}) según las pasturas monoespecíficas o mixtas.

El pasto dominado por el género *Brachiaria* es el que acumula mayor cantidad de carbono, seguido del Estrella, quedando las mezclas con el menor promedio (Cuadro 21). El género *Brachiaria*, tanto asociado o no fija mayor carbono que el Estrella, siendo esta diferencia de un 43% en pasto monoespecífico y un 2 % en pasto mixto. Por lo tanto el tipo de pasto que mayor tasa de fijación tiene es el pasto de *Brachiaria*, seguido del Estrella, sin embargo las asociaciones de estos dos tipos comparado con la asociación de pasto Estrella con Kikuyo no reflejan diferencias muy significativas.

Cuadro 21. Carbono fijado por el pasto según las especies.

Tipo de pasto	Carbono fijado (Mg de C/ha)
Brachiaria	4,73 ± 1,79
Estrella	2,72 ± 0,91
Brachiaria con Estrella	2,51 ± 0,76
Kikuyo con Estrella	2,46 ± 0,01

El carbono acumulado aumenta hasta llegar a un máximo entre los 6 y 8 años de la pastura, disminuyendo lentamente hasta los 25 años. El inicio del modelo se tomó al año de ser plantada la pastura y como edad máxima se tomó a los 25 años (Figura 12).

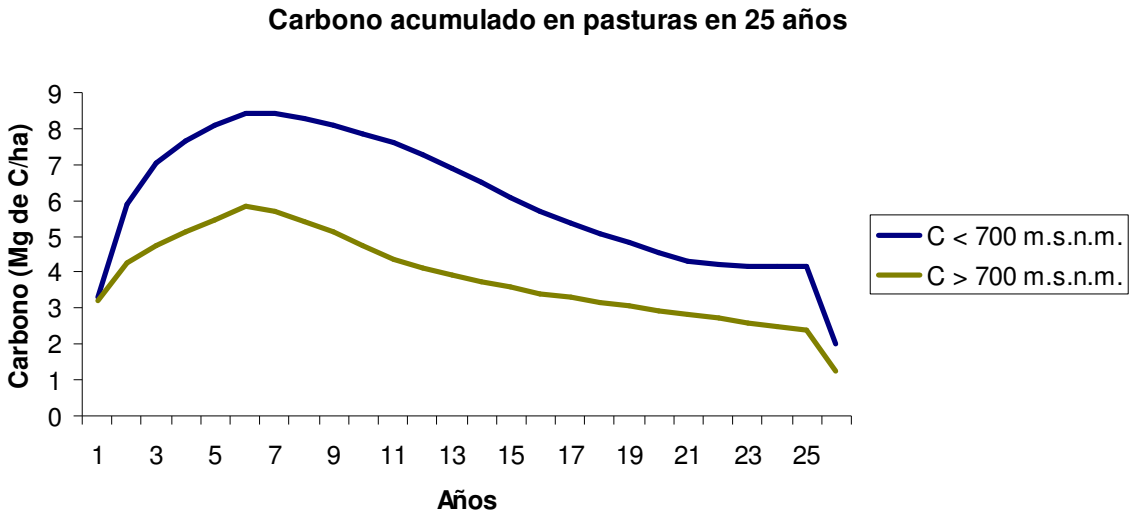

Figura 12. Modelo del carbono acumulado (Mg de C.ha^{-1}) en la biomasa aérea de las pasturas, repartidas entre los rangos de altitud por encima y por debajo de 700 msnm, para 25 años.

1.5.2.4. Variables del ganado de pastoreo relacionadas con las existencias de carbono

No existe una buena correlación entre el carbono máximo por rotación, el remanente y el del pasto consumido frente a la unidad animal y la carga animal, excepto para la unidad animal frente al carbono antes del paso del ganado (Cuadro 22).

Cuadro 22. Correlación y P-valor entre el carbono máximo fijado, el carbono remanente y el carbono consumido con la unidad animal y la carga animal.

	Coeficiente de correlación		
	Carbono máximo	Carbono mínimo	Carbono consumido
unidad animal	0,6324	0,5543	0,3299
carga animal	0,1169	-0,0462	0,3091

Nota: P-valor significativo ≤ 0,01 para un nivel de confianza del 99%.

Al agrupar el carbono consumido según los tamaños de las fincas, encontramos que el pasto consumido tiende a disminuir ligeramente con el tamaño de la finca, para

una carga animal más o menos constante, siendo el promedio 4,99 ± 0,8 Kg·ha^{-1} (Figura 13).

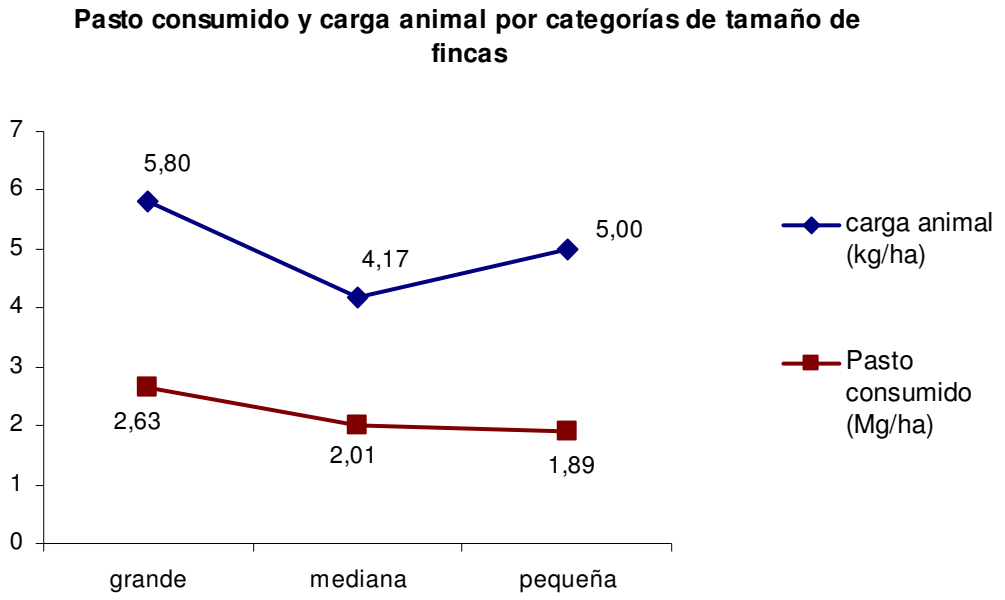

Figura 13. Tendencia del pasto consumido (Mg·ha^{-1}) según la carga animal (Kg·ha^{-1}) y el tamaño de la finca.

1.5.2.5. Variables del uso de las pasturas relacionadas con las existencias de carbono

Al comparar el uso de las pasturas (rotación, número de días que el ganado permanece en los potreros, días de recuperación del pasto) con la acumulación de carbono, encontramos diferencias muy pequeñas, ya que el manejo de fincas y potreros es muy similar.

El manejo de las pasturas, la rotación del ganado en la finca, no se debe estudiar sin tener en cuenta la carga animal. Separando los potreros según el tamaño, grandes o pequeños, se observa que el pasto consumido por el ganado es menor para los potreros pequeños aún siendo su carga animal y el tiempo de permanencia del ganado en el potrero, mayores (Figura 14).

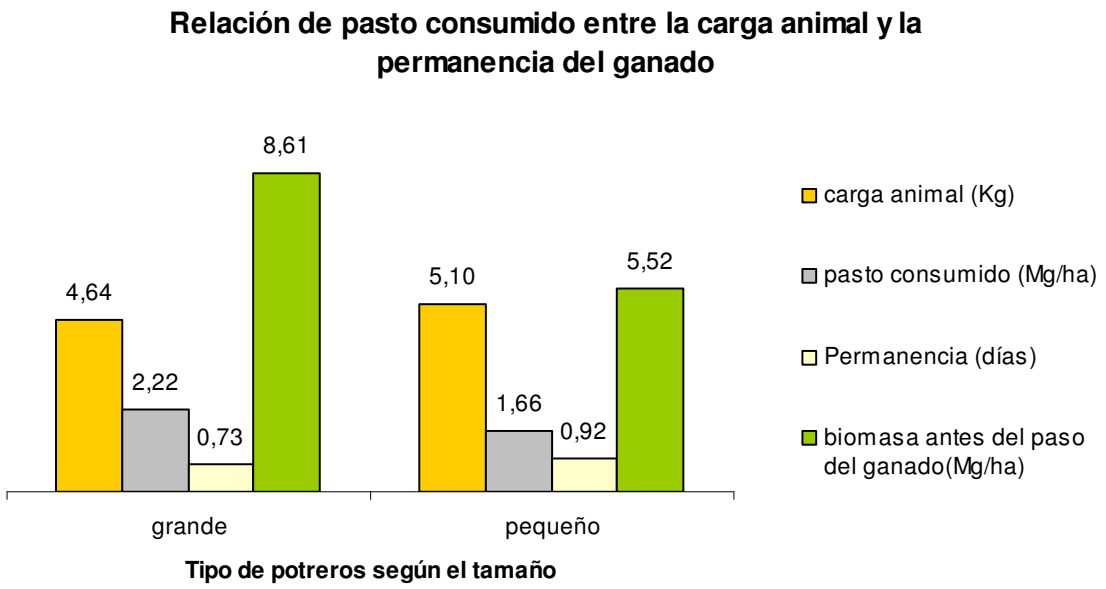

Figura 14. Pasto consumido (Mg·ha^{-1}) una vez pasado el ganado en función de la permanencia (días) de éste en el aparto y la carga animal (Kg.) y pasto antes del paso del ganado.

Sin embargo, si calculamos el pasto consumido en tanto por cien respecto del pasto máximo producido por ciclo, obtenemos que en los potreros de mayor tamaño el porcentaje de pasto consumido es de un 25,69%, a los cuales les corresponde una menor carga animal, sin embargo la fracción de pasto consumido por la carga animal es de 0,478. En los de menor tamaño pero mayor carga animal, la relación viene siendo de un 30,07% y la fracción de pasto consumido entre la carga animal es de 0,325. Por lo que podemos concluir que en los potreros grandes el consumido es mayor, aunque la proporción de pasto respecto del producido sea menor.

Ahora bien, si comparamos la rotación media (número de días de recuperación del pasto más la permanencia del ganado en el potrero) de las fincas, grandes, medianas y pequeñas, observamos que en las fincas donde la rotación es de menor duración, la producción de pasto y por consiguiente la acumulación de carbono antes del paso del ganado, es mayor. Esto viene acompañado también con el menor número de días de permanencia del ganado en los potreros. Entre las fincas de tamaño mediano y pequeño, resulta que a igual número de días de permanencia del ganado, la mayor acumulación la encontramos en las fincas con duración de la rotación más cortas (Figura 15).

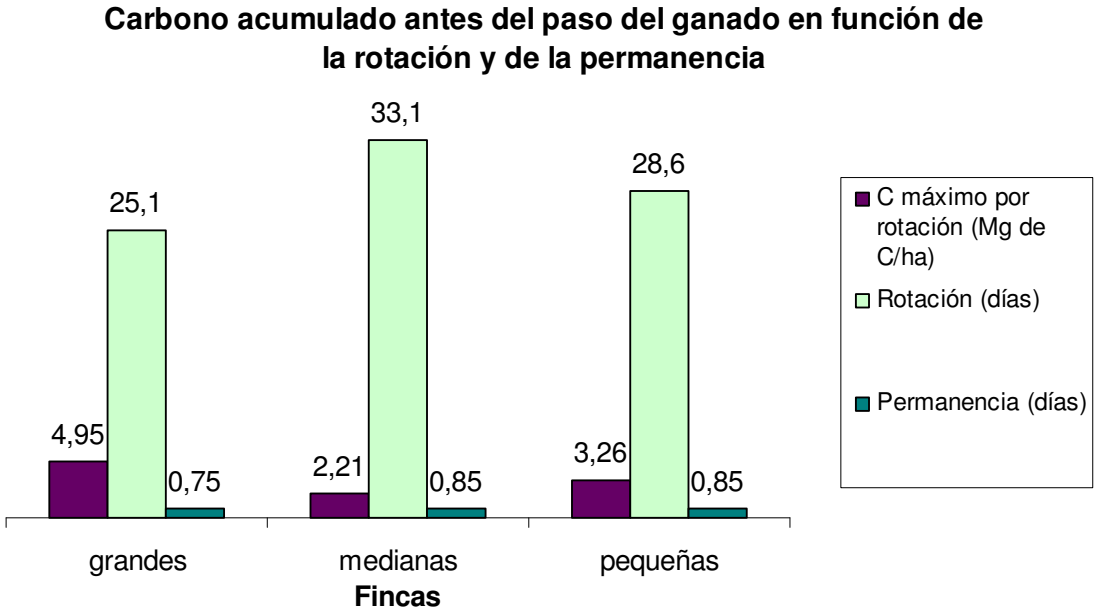

Figura 15: Carbono acumulado en el pasto antes del paso del ganado en función de la rotación y permanencia media según el tamaño de las fincas. La rotación viene a ser el número de días de descanso del pasto más el número de días de permanencia del ganado en el potrero.

5.3. Remociones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

5.3.1. Remoción de GEI en Bosques

La superficie boscosa representa un 52% de la total de Corredor, siendo 58,609 ha, y sus remociones de gases de GEI alcanzan valores de 288.265 Mg· CO_2e[3]. La captura de gases de GEI se realizó para cada grupo de altitud (Figura 16). Las mayores remociones se encontraron en las áreas boscosas de los grupos de altitud 1 y 2, siendo éstas 58.819 Mg· CO_2e y 56.578 Mg· CO_2e respectivamente. Estos abarcan la mayor superficie de bosques y corresponden a la zona de vida de bosque muy húmedo tropical transición a premontano. Las menores remociones, 6,340 Mg· CO_2e, se registran en los

[3] Los datos reportados en esta sección serán dados en Mg de CO_2 equivalente, la cual representa la unidad homogénea para los GEI. Esto quiere decir que las emisiones de los distintos gases son expresadas en la cantidad de CO_2 necesaria para producir el mismo efecto que éstos.

bosques de altitud entre 2000 y 2700 m.s.n.m. correspondientes a la zona de vida bosque pluvial montano, al registrar también la menor superficie, 2,13% del total.

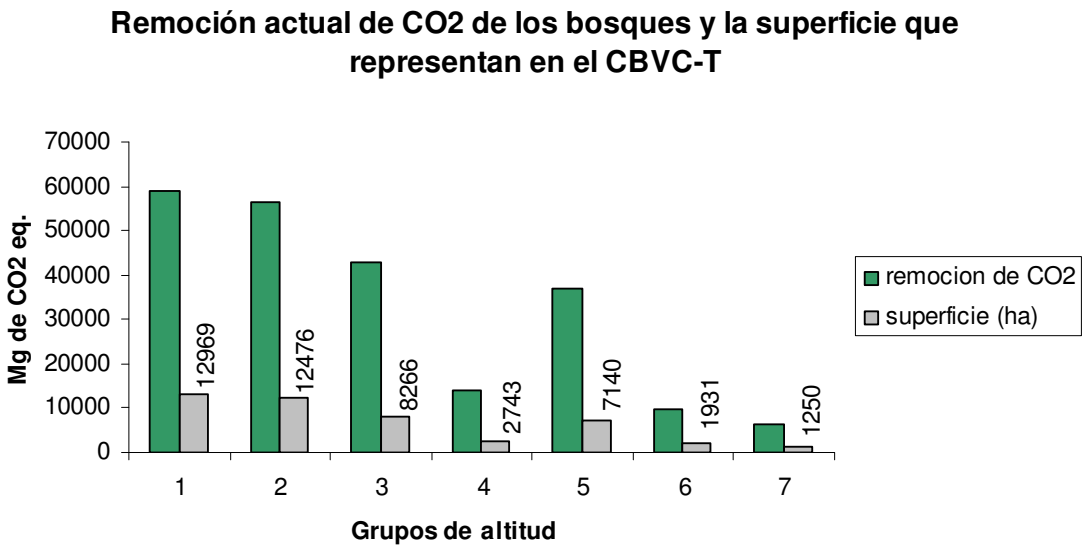

Figura 16. Remociones de CO_2 por los bosques según los grupos de altitud y el área que representan en el CBVC-T.

5.3.2. Remoción de GEI en el CBVC-T sin proyecto

Las remociones de carbono sin proyecto, recogidos en la cuadro 23, sólo fueron tomadas en cuenta por el crecimiento de la cobertura arbórea. Por lo tanto, para los usos de suelo actuales en agricultura, pastos no arbolados, los cultivos de caña de azúcar y por supuesto el suelo desnudo o zonas quemadas, se consideró que las remociones de estos son nulas. Las mayores remociones de carbono se encuentran en los bosques (1.706.370 Mg· CO_2e), debido a su extensión, prácticamente el 50% de la superficie total del corredor y su mayor potencial de acumulación de biomasa. Los sistemas silvopastoriles presentan altos niveles de remociones de 373.887 y 210.022 Mg· CO_2e pasados 5 años, con tasas de crecimiento de 4,39 y 4,42 Mg· CO_2e ·ha·año^{-1} para los rangos de altitud mayor y menor de 700 m.s.n.m. respectivamente. Las remociones actuales, tendiendo en cuenta la distribución del territorio, son de 742.127 Mg· CO_2e para el año 2012, y pasado 10 años será de 8.102.447 Mg· CO_2e.

Cuadro 23. Remoción (Mg· CO_2e) actual y futura, proyección hasta 10 años, de los usos actuales del corredor CBVC-T.

Tipo de cobertura	**Área (ha)**	**Año del proyecto**					
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**10**
Pasto	21719,17	0	0	0	0	0	0
Pasto arbolado < 700 msnm	2591,81	74.777	149.555	224.332	299.110	373.887	822.552
Pasto arbolado >700 msnm	4647,90	42.004	84.009	126.013	168.018	210.022	462.049
Agricultura	996,38	0	0	0	0	0	0
Caña de azúcar	4832,38	0	0	0	0	0	0
Café	973,88	3.570	7.141	10.712	14.283	17.854	39.279
Café con sombra	8764,93	154.477	308.954	463.431	617.908	772.385	1.699.247
Suelo desnudo	195,84	0	0	0	0	0	0
Plantaciones	863,08	67.406	134.813	202.220	269.627	337.034	606.662
Charral	7073,22	38.424	76.848	115.272	153.696	192.121	422.666
Bosque	58609,28	288.265	841.573	1.129.839	1.418.105	1.706.370	4.012.497
Total	**111267,87**	**668.923**	**1.602.893**	**2.271.819**	**2.940.747**	**3.609.673**	**8.064.952**

Nota: cálculos propios.

Las remociones de gases de efecto invernadero en bosques representan entre el 40-50% del total de las remociones siendo su superficie un 52% de la total del corredor. Las plantaciones con sólo un 0,775% de superficie sus remociones representan casi un 10% del total, al contrario que en los cultivos de café, con un área aproximada a las anteriores, pero con un porcentaje de remoción alrededor de un 1%. Los sistemas agroforestales, tanto como los sistemas silvopastoriles o el café con sombra tiene porcentajes de remoción similares, entre el 20-25%, con respecto a la superficie que representan, 6,30% para los SSP y un 7,87% para el café con sombra. Los usos de suelo forestales, bosque, plantaciones y charral, son aquellos con mayor potencial de remoción además de representar el 59% de la superficie del corredor. Los sistemas agroforestales capturan entre un 35 y 40% de las emisiones representando tan sólo un 14% del territorio (Figura 17).

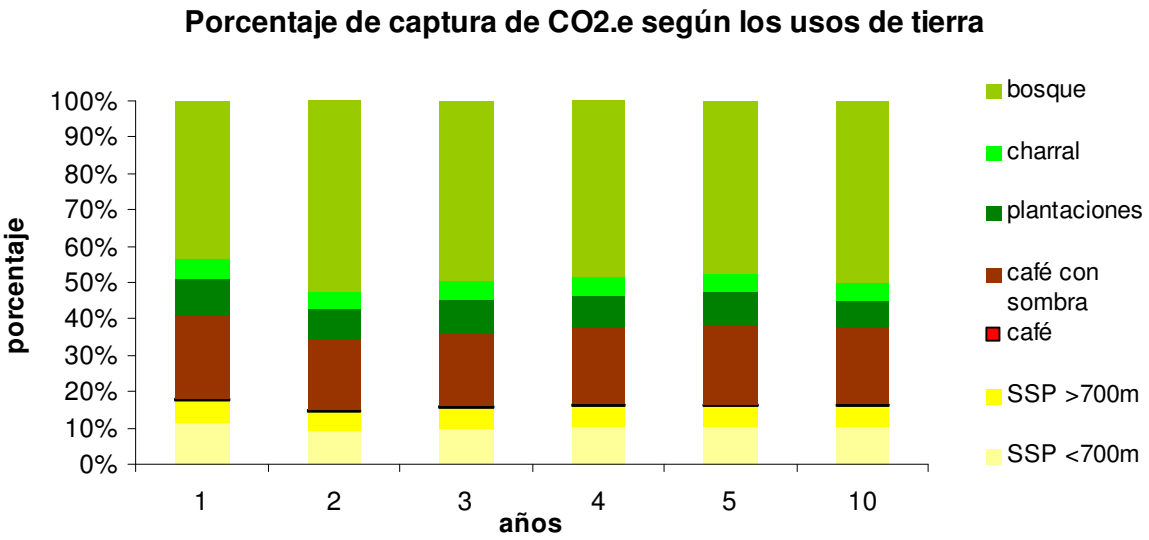

Figura 17. Proporción de las remociones de CO_{2e} según los distintos usos de suelo considerados potencialmente removedores de CO_2.

5.3.3. Expectativas de remoción de GEI en el CBVC-T bajo escenarios de proyecto

3.5.3.1. Escenario de restauración de corredores riberanos

Este escenario asumió el cambio del uso del suelo distinto al uso forestal en los corredores riberanos, él cual alcanzaría 38.225 Mg·CO_2e de remociones netas después de 5 años, respecto de la línea base para un total de 285,12 ha. El cambio de uso de suelo mediante plantaciones forestales removería un total de 23.788 Mg·CO_2e en 5 años y el aumento de la cobertura de plantaciones y charrales sería de 14.467 Mg·CO_2e. La implementación de bosque sobre pastos resultó en emisiones netas de CO_2e durante el primer año. La evolución de las remociones o emisiones a lo largo del proyecto se observan en el cuadro 24.

Cuadro 24: Balance de remociones netas acumuladas (Mg·CO_2e) al aumentar la cobertura arbórea en 285,12 ha de áreas riberanas en CBVC-T.

Tipo de cobertura		Área (ha)	Balance de emisiones acumuladas por año (Mg·CO_2e)						
Original	Proyecto		Línea base	1	2	3	4	5	10
Cultivos	Plantación	14,8	0	179	550	1.112	1.865	2.809	8.548
Caña de azúcar	Plantación	46,0	0	15	623	1.825	3.619	6.006	23.792
Suelo desnudo	Plantación	9,8	0	126	378	757	1.262	1.893	5.679
Pasto	Plantación	113,0	0	-299	858	3.474	7.548	13.080	56.819
Charral	Bosque	44,82	245,07	2.914	3.933	4.952	5.971	6.990	13.105
Café	Bosque	56,7	207,94	5.930	6.317	6.704	7.090	7.477	9.798
Total		**285,12**	**453,11**	**8.865**	**12.659**	**18.824**	**27.355**	**38.255**	**117.741**

Nota: cálculos propios.

3.5.3.2. Escenario de conectividad biológica

La implementación de 1935,88 ha con cultivos de café con sombra para aumentar la conectividad biológica dentro del corredor aumentaría las remociones en un 100% respecto del la línea base, removiendo 500.441 Mg·CO_2e al cabo de 5 años. El 72% de la captura de GEI se debe al cambio del cultivo de caña de azúcar por café con sombra, inclusive si éste emite 20.390 Mg·CO_2e durante el primer año del proyecto (Cuadro 25).

Cuadro25: Balance de remociones netas acumuladas (Mg·CO_2e) al aumentar la conectividad biológica mediante la implementación de áreas con cultivos de café con sombra basado en las áreas prioritarias de Estrada (2009).

Tipo de cobertura		Área (ha)	Balance de emisiones acumuladas por año (Mg·CO_2e)						
Original	Proyecto		Línea base	1	2	3	4	5	10
Cultivos	Café con sombra	109,57	0	3.700	11.213	22.539	37.678	56.630	171.019
Caña de azúcar	Café con sombra	1.328,75	0	-20.390	5.457	77.546	195.874	360.442	1.747.632
Pasto <700 m.s.n.m.	Café con sombra	41,8	0	929	3.313	7.152	12.445	19.193	62.831
Pasto <700 m.s.n.m.	Café con sombra	455,76	0	1.074	8.029	20.865	39.580	64.176	240.584
Total		**1935,88**	**0**	**-1.4687**	**28.012**	**128.102**	**285.577**	**500.441**	**2.222.066**

Nota: cálculos propios.

3.5.3.3. Escenario de manejo sostenible de la tierra

Las emisiones netas alcanzadas al implementar actividades de manejo sostenible alcanzarían aproximadamente 401.807 Mg·CO_2e para un 20% del territorio total. Estas se verían compensadas por las remociones del escenario de conectividad biológica, en el cual su área representa un 1,7% del territorio. Se remarca que al cabo de 10 años las remociones debidas a este escenario alcanzan niveles tan altos como para el escenario anterior unos 2,1 millones de Mg·CO_2e. Estas emisiones se deben al cambio de uso del suelo de pasto tradicional a sistemas silvopastoriles y el cambio de cultivos de café a café con sombra.

Cuadro26: Balance de remociones netas acumuladas (Mg·CO_2e) al establecer medidas de manejo sostenible de la tierra en 23.150,24ha en cultivos, áreas quemadas, pastos tradicionales y cafetales.

Tipo de cobertura		Área (ha)	Balance de emisiones acumuladas por año (Mg·CO_2e)						
Original	Proyecto		Línea base	1	2	3	4	5	10
Cultivos	SAF	871,99	0	380	2.150	5.311	9.862	15.802	57.505
Área quemada	Plantación	195,844	0	1.039	4.606	10.699	19.319	30.466	106.270
Pasto	SSP	21108,53	0	-205.973	-343.441	-412.404	-412.861	-344.812	1.710.356
Café	Café con sombra	973,88	3.570	-45.783	-79.001	-99.654	-10.7742	-10.3265	273.688
Total		**23150,24**	**3570**	**-250.336**	**-415.685**	**-496.047**	**-491.421**	**-401.807**	**2.147.819**

Nota: cálculos propios.

Por lo tanto las remociones totales sin proyecto al cabo de 5 y 10 años son de 3,6 millones de $Mg \cdot CO_2e$ y 8 millones de $Mg \cdot CO_2e$, respectivamente para toda la extensión del CBVC-T. Al cabo de 5 y 10 años los cambios propuestos en 25.371 ha, 22% del territorio total, aumentarían en 136.889 $Mg \cdot CO_2e$ y 4,4 millones de $Mg \cdot CO_2e$ respectivamente. Las estimaciones de este escenario parten del supuesto que todas las áreas propuestas para aumentar la conectividad estuviesen disponibles, por lo que las remociones reportadas son valores máximos potenciales.

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1. Bosques

Varios estudios han probado que la acumulación de carbono en el trópico, teniendo en cuenta el sistema total (suelo + biomasa aérea), los bosques, tanto primarios como secundarios, son los que presentan mayores niveles (Amézquita et *al.*, 2005).

Se debe incluir en el estudio el tipo de habitat, la pendiente y el uso histórico, que son factores potenciales a la hora de evaluar la acumulación de carbono en la biomasa aérea (Mascaro et *al.,* 2011).

En general los factores de temperatura y precipitación influyen positivamente en la productividad primaria neta (PPN). Sin embargo a precipitaciones mayores de 3500 $mm \cdot año^{-1}$ en los bosques húmedo tropicales, pasan a influir negativamente sobre el crecimiento de los árboles. Esto se debe a que a tan alta disponibilidad de agua, se provoca un aumento del lavado de nutrientes y una disminución en la difusión entre los gases del suelo y la atmósfera, provocando así condiciones anaerobias en el suelo. Estas condiciones a su vez disminuyendo la concentración de nitrógeno que provoca una disminución en la PPN (Schuur et Matson, 2001). Raich et *al.* (2006), afirmaron que el aumento de la temperatura media anual (TMA), influye positivamente en la PPN. Sin embargo en los bosques cálidos tropicales, esto se invierte disminuyendo la PPN, y por lo tanto la acumulación de carbono, con el aumento de la TMA, a razón de 8 $Mg\ C \cdot ha^{-1} \cdot {}^{o}C^{-1}$. Esto se debe a que la velocidad de descomposición de la materia orgánica del suelo aumenta más con la TMA que la PPN. Con lo dicho anteriormente y sabiendo que con el aumento de la altitud disminuye la temperatura, se corrobora la tendencia de mayor concentración de carbono en los bosques del corredor, a medida que aumentamos en altitud.

El bosque muy húmedo tropical transición a premontano, nivel de altitud 2, se caracteriza por una PMA de 3342 $mm \cdot año^{-1}$ y una TMA de 23,7ºC, siendo la precipitación más baja que 3586,6 $mm \cdot año^{-1}$ correspondiente al bosque húmedo premontano, nivel 3, y su temperatura más alta, por lo tanto, justificándose así la menor acumulación de carbono en el primer bosque que en el segundo. Sin embargo, los

resultados más bajos encontrados para el nivel de altitud 4 que en el nivel 3, se deben a que el bosque pluvial premontano registra una PMA de 3672,5 mm·año^{-1}, habiendo sobrepasado el límite de PMA dónde la influencia se vuelve negativa sobre la PPN. Por el contrario, en el rango de mayor altitud, encontramos los valores más bajos en cuanto a PMA y TMA, 3295 mm·año^{-1} y 16,5ºC respectivamente (Hughes et *al.*, 2010), favoreciendo así a la mayor PPN y por lo tanto a la mayor acumulación de carbono entre los bosques primarios del corredor.

La zona de vida del bosque muy húmedo tropical transición a premontano, registró una acumulación de carbono de 80,78 ± 5,25 Mg de C·ha^{-1}, comparable con los datos registrados por Hughes et *al.* (2010), con un promedio de 139,5 ± 10,37 Mg de C·ha^{-1}. La zona de vida de bosque muy húmedo premontano acumuló 154,89 Mg de C·ha^{-1}, mientras que Hughes et al. registraron datos de 220 ± 13,79 Mg de C·ha^{-1}. El bosque pluvial premontano registró promedios de 115,88 ± 67,32 Mg de C·ha^{-1} y Hughes et *al.* de 207± 21,35 Mg de C·ha^{-1}. En el rango de mayor altitud se obtuvieron los mayores valores de carbono acumulado en la biomasa, 195,80 ± 12,17 Mg de C·ha^{-1}, siguiendo la misma tendencia que el estudio de Hughes et *al.*, 251 ± 57,87 Mg de C·ha^{-1}. En los dos estudios se puede apreciar que hay una disminución del carbono acumulado en la biomasa aérea para la zona de vida del bosque pluvial premontano.

El bosque muy húmedo premontano se caracteriza por sus árboles de 30 a 40 metros de altura y con un sotobosque de árboles de 10 a 20 metros de altura. Sin embargo en el bosque pluvial las alturas de los árboles no superan los 15 y 25 metros, con un sotobosque de 8 a 15 metros de altura, lo que explica la menor biomasa acumulada por encima del suelo. En el bosque pluvial montano bajo, los árboles alcanzan alturas de 25 a 30 metros, incluso hasta 50 metros alcanzados por algunos ejemplares de *Quercus* y la altura del sotobosque se encuentra entre los 10 y 20 metros (Canet, 2008). Es por esto que en esta zona de vida se registran datos muy altos de acumulación de carbono pero además de un alto valor de la desviación estándar.

El valor promedio obtenido del carbono almacenado en biomasa arriba del suelo en los bosques secundarios es 89,30 ± 40,72 Mg de C·ha^{-1}, comparables al reportado por el estudio de Ortiz (1999) en Costa Rica, donde el valor promedio de biomasa es de 150 Mg de C·ha^{-1}, multiplicado por la fracción de carbono contenida en la biomasa,

corresponde a 75 Mg de C.ha^{-1}. Cifuentes (2008) reportó datos de biomasa aérea total de bosques pluvial premontano, húmedo y húmedo premontano, secundarios en Costa Rica, del orden de 173,06 Mg·ha^{-1}, por lo tanto 86,53 Mg de C·ha^{-1}. Estos resultados provienen de bosques con edades entre 25 y 35 años.

Los resultados de acumulación de carbono de los bosques secundarios tienden a seguir el gradiente de altitud. El promedio obtenido para la zona de vida bosque tropical transición a premontano de 90,53 ± 20,33 Mg de C·ha^{-1} es comparable al reportado por Cifuentes (2008), 81,51 ± 25,69 Mg de C·ha^{-1} para la zona de vida bosque húmedo transición a basal de la zona Atlántica. La zona de vida de bosque muy húmedo premontano registró acumulaciones de 44,64 ± 20,67 Mg de C·ha^{-1} y 42,30 ± 13,85 Mg de C·ha^{-1}. En comparación Neuman-Cosel et *al.* (2011) midió bosques secundarios en Panamá, clasificado como bosque húmedo tropical, de edades entre 12 y 15 años, registrando datos de biomasa aérea de 80,38 ± 21,65 Mg·ha^{-1}, lo que resulta 40,19 Mg de C·ha^{-1}. La estimación del carbono acumulado en el bosque pluvial premontano es de 108,66 ± 30,72 Mg de C·ha^{-1}, comparable al estimado por Cifuentes (2008), 92,53 Mg de C·ha^{-1}, para la misma zona de vida en bosques de Costa Rica. No se encontraron resultados de acumulación de carbono en la biomasa aérea para el resto de las zonas de vida de bosques secundarios.

Sin embargo la estimación de biomasa arriba del suelo y por lo tanto la acumulación de carbono varía considerablemente entre estudios, debido al uso de diferentes ecuaciones alométricas (Neuman-Code et *al.* 2011). Los resultados obtenidos se sacaron a partir de una ecuación alométrica de carácter general (Chave et *al.,* 2005) para bosques lluviosos. Por lo tanto, las estimaciones de biomasa, basadas en estimaciones de altura y datos recogidos en el campo, más la estimación de la fracción de carbono contenida en la biomasa, arrastran un error que hay que tenerlo en cuenta a la hora de observar los datos.

6.2. Pastos

El crecimiento de los pastos es afectado por diversos factores, algunos propios a la planta tales como la especie, la edad, la propia morfología entre otros, o bien por

factores extrínsecos a ella como las condiciones climáticas, las características fisiográficas y el efecto de los animales sobre él. Estos factores afectan a la calidad de la planta y a la producción de biomasa, y por lo tanto a la acumulación de carbono en ella (Cubillos et al, 1975; Pezo, 1982, en Suyen 1992).

Es difícil encontrar datos publicados sobre estudios de acumulación de carbono en la biomasa aérea en pasturas, ya que es un campo poco explorado (Guild et al 1998, Kauffman et al. 1998, Hughes et al. 2000 and 2002, Jaramillo et al.2003, en Jobse, 2008), además de la disparidad de metodologías utilizadas. La mayoría de los estudios realizados sobre la acumulación de carbono en pasturas son realizados sobre la variable del suelo, por ser ésta el depósito que acumula entre un 90 y 98% del carbono total del sistema (Amézquita et *al.*, 2010).

Jobse, en 2008, reportó resultados de biomasa aérea en pasturas según las distintas zonas de vida en Costa Rica. Las fincas muestreadas a menor altitud se encuentran en la zona de vida de bosque muy húmedo premontano, además de la finca de Felipe Rivera que se sitúa a 1200 m.s.n.m. El promedio obtenido para ésta zona de vida fue de 4,74 ± 1,79 Mg de $C \cdot ha^{-1}$, comparables con los obtenidos por Jobse en la zona de vida de bosque tropical húmedo premontano, 6,1 ± 0,7 Mg de $C \cdot ha^{-1}$. Las zonas altas las fincas situadas en las cercanías de Guayabo, las fincas de Evertilio Aguilar y Jorge Guillén, se caracterizan por la zona de vida de bosque pluvial premontano, con un promedio de 2,52 ± 0,01 Mg de $C \cdot ha^{-1}$ comparable al reportado por Jobse para la misma zona de vida, 2,6 ± 0,5 Mg de $C \cdot ha^{-1}$. Las fincas de la región de Santa Cruz son caracterizadas por la zona de vida bosque húmedo montano bajo, reportando un promedio de 2,57 ± 0,76 Mg de $C \cdot ha^{-1}$, los cuales no pueden ser comparados por no existir literatura para esta zona de vida.

El estudio realizado por Mora (2001) en pastos de altura, donde las condiciones meteorológicas se asemejan a las de Santa Cruz, se obtuvieron datos de biomasa no comestible en Mg de $C \cdot ha^{-1}.año^{-1}$ del orden de 9,6 ± 0,38 de pasto + 6,5 ± 0,14 de hojaras del tipo Kikuyo y 9,2 ± 0,2 + 6,01 ± 0,15, de pasto y hojarasca respectivamente, del tipo Estrella. Estos datos son menores a los obtenidos en este estudio, 28, 37 ± 6,97 Mg de $C \cdot ha^{-1}.año^{-1}$, para la mezcla de Kikuyo con Estrella y 24, 76 ± 8,70 Mg de $C \cdot ha^{-}$

^{1}.año^{-1} para pasto Estrella, por haber sido calculados a partir de la biomasa no comestible solamente, mientras que nuestro estudio tuvo en cuenta la biomasa total.

Bronstein, en 1984, recoge datos reportados por otros autores de la producción del pasto Estrella, ya utilizado en Costa Rica en aquella época. Estos reportan datos de producción de biomasa del orden de 32 Mg MS·ha^{-1}.año^{-1} en potreros dedicados al pastoreo con uso de fertilizantes. Aplicándole el coeficiente de fracción de carbono del 0,5, se obtiene una tasa de acumulación de carbono de 16 Mg MS·ha^{-1}.año^{-1}, dato muy próximo al obtenido en el estudio, 17 Mg MS·ha^{-1}.año^{-1}, en la finca de Diana Díaz, donde los potreros contenían pasto Estrella únicamente y el uso de fertilizantes nitrogenados es aplicado una vez al mes.

Los pasto que se encuentran a un altitud mayor de 700 msnm dieron resultados más bajos en cuanto a la acumulación de carbono, un 31% menos con respecto a los pastos muestreados a menor altitud. Aunque el coeficiente de relación entre las variables de altitud y el carbono acumulado antes del paso del ganado no fuese muy significativo (coef. Correlación= -0,519), se aprecia una diferencia entre los resultados obtenidos a distintas alturas. Este hecho se puede explicar porque en las zonas bajas el pasto dominante es del género *Brachiaria sp.* mientras que en las zonas altas es el *Cynodon pletostachyus*. La disponibilidad forrajera era evidentemente mayor en los pastos donde predominaba el primer género. En el estudio de Hernán et al., 2008, se compara la acumulación de carbono entre la *Brachiaria brizantha* y *Hyparrhenia rufa* (especie correspondiente a pasto natural en Costa Rica) y se demuestra que el promedio de producción anual de materia seca de la *B. brizantha* es un 180% superior que la *H. rufa*. Además, en 2007, González observa que el género *Brachiaria* tiene mayor disponibilidad forrajera que el pasto Estrella, obteniendo una diferencia de 600 Kg MS/ha. Avila, en 2000, obtuvo resultados para la especie *Brachiaria brizantha* a plena exposición solar de 2,04 Mg de C/ha, comparables a los obtenidos para la misma especie en la fincas de Jhon Badilla y Ricardo Gamboa, 2,93 y 2,19 Mg de C/ha respectivamente.

Los puntos de muestreo correspondientes a las zonas de mayor altitud se encuentran en la zona de Santa Cruz y de Guayabo, zonas donde la pendiente tiende a ser ligeramente mayor que en las zonas bajas. Las zonas de altitud menor a 700 msnm

se encuentran en la zona baja del valle y en general con menor pendiente. La comparación de la pendiente con la mayor concentración de carbono en la biomasa, no dieron resultados estadísticamente significativos, pero si podemos afirmar que una mayor pendiente conlleva, en caso de fuertes lluvias asociado al pastoreo, un aumento del efecto erosivo, influyendo así en el crecimiento de las plantas, por pérdida de nutrientes en la capa superficial. (Morga, 1997 en Salas 2011). Este hecho fue corroborado por los productores de las zonas altas, que tras las fuertes y no habituales lluvias acaecidas durante el mes de Diciembre del 2010, apreciaron una menor producción de pastos en sus terrenos. En el estudio de Casasola, 2010, se estudió la influencia de los eventos extremos en el clima (lluvias intensas y prolongadas) de la última década en la zona de Santa Cruz, Turrialba, y se observó la disminución del orden de un 23% en la productividad de la fincas en los periodos de clima extremo.

En los potreros de altura (altitud mayor a 700 msnm) donde el terreno es más vulnerable a la erosión por las lluvias intensas, el uso de especies rastreras es recomendable, o por lo menos la combinación de éstas con la especie de pasto deseado (Nieuwenhyse, 2010). El menor contenido de carbono por la menor producción de biomasa aérea se encontró en las fincas de Mauricio Vargas y Pedro Casasola, 2,30 y 1,63 Mg de C/ha. La edad de las pasturas es de 15 y 25 años respectivamente y el pasto plantado en un principio fue la mezcla de Kikuyo y Estrella. Sin embargo, con el paso del tiempo y debido a los episodios extremos del clima, la composición del pasto ha ido cambiando, siendo conquistado por especies de pasto natural o nativo. Este tipo de pasto es menos productivo y al no tratase de un tipo de pasto rastrero conlleva a efectos de degradación más pronunciados.

La producción de biomasa aérea en los pastos cuando ha sido utilizada en proyecciones futuras de acumulación de carbono se ha considerado constante. Sin embargo el modelo creado en este estudio nos predice otra tendencia. La producción de biomasa y por lo tanto la tendencia del carbono acumulado en ésta, aumenta en los primeros años, en un 183% para los pastos de altura y un 266% para los pastos a menor altitud de 700 msnm, hasta llegar a un máximo de producción entre los 6 y 8 años. A partir de ahí, la producción disminuye entre un 40 y 60% al cabo de 25 años, edad máxima para el manejo de una pastura para producción lechera, a partir de aquí estas suelen ser reemplazadas. El estudio de Jobse (2008) determinó que la concentración de

carbono y nitrógeno en el ecosistema pastoril disminuye con la edad de la pastura. Esta disminución se debe a la intensificación del sistema y por lo tanto su progresiva degradación a causa del pastoreo.

Los pastos son plantas con un metabolismo C_4 que alcanzan la productividad máxima a plena luz (Mora, 2001), por lo que la orientación de los potreros influye en el crecimiento y producción de los pastos. Los resultados obtenidos dentro de los pastos de poca altura, se puede observar que los mayores niveles de acumulación se encuentran en los potreros con orientación nula, entre un 40 y 50% más que los pastos orientados al noroeste. En cuanto a los pastos de altura, de los 8 potreros, sólo uno de ellos está orientado hacia el noroeste, mientras que el resto están orientados hacia la vertiente sur, siendo éste el de menor contenido de carbono en la biomasa aérea.

La carga animal fue recalculada con la ecuación 2, la cual toma en cuenta la rotación total del manejo de la pastura, el número de días de reposo de la pastura, la unidad animal y el área del potrero muestreado. Estos resultados fueron mayores que los obtenido por Casasola, 2010, en la misma zona del corredor, en Santa Cruz, donde la tendencia difiere en las fincas de tamaño "grande". En el estudio de Casasola estas tienden a una menor carga animal que en el resto, mientras que en nuestro estudio las fincas de tamaño "grande" fueron las que reportaron mayores niveles de carga animal. Esto puede deberse a un aumento en la intensificación del uso para aumentar su productividad, ya que estas en 2010 reportaban los valores más bajos en productividad (Casasola et *al.,* 2010). Sin embargo el consumo de pasto por el ganado no es proporcional a la carga animal, sino que es proporcional al tamaño de la finca, esto se debe a que los ganaderos alimentan al ganado con suplementos de bananos, pasto forrajero o concentrados, durante el ordeño.

6.3. Remoción de carbono y otros gases de efecto invernadero actual y futura

A partir de los datos recogidos en parcelas de muestreo de carbono, hay que tener en cuenta las limitaciones que estas parcelas pueden tener a la hora de extrapolar estos datos para representar la acumulación de carbono en un paisaje. El cálculo de acumulación de carbono realizado siguió una estratificación del gradiente de altitud, no

teniendo en cuenta la pendiente del terreno, la cual puede influir en la densidad de carbono dentro de un mismo rango de altitud y de un tipo de bosque (Mascaro et *al.,* 2011). La extensión espacial puede ser una limitación a la extrapolación de datos obtenidos en parcelas de muestreo, cuando se trata de caracterizar una zona a nivel de paisaje (Mascaro et *al.,* 2011). Estos métodos pueden ser insuficientes para describir la dinámica de comunidades a largo plazo, pero estas sirven para ir formando un historial, y con el tiempo ver su evolución (Hubbel et al, 1999; Carson and Schenitzer, 2008 en Mascaro et *al.,* 2011).

Además la poca información de las extensiones actuales de bosque primario o secundario hace imposible la extrapolación de los datos por separado. Es por esto que la extrapolación se hizo a partir de la acumulación de carbono obtenida para los bosques secundarios, ya que éstos forman la mayoría del paisaje boscoso. Los primarios han sido intervenidos de manera excesiva durante los últimos años y prácticamente han desaparecido, las únicas formaciones boscosas primarias que todavía resisten son aquellas con gran dificultad de acceso (Brenes, com. Per.)

El potencial de remoción de pastos arbolados y de los cafetales con sombra es alto, de 271,258 $Mg \cdot CO_2e$, debido a su extensión de 16,000 ha, representando el 14% de la superficie total. Además, los árboles aislados presentan tasas de crecimiento mayores inclusive que árboles en bosques naturales, los cuales llegan a remover 288.265 $Mg \cdot CO_2e$ abarcando una superficie el 52% de la total. Sin embargo, al cabo de 10 años la diferencia entre el sistema boscoso y los SAF es aproximadamente de 1 millón de $Mg \cdot CO_2e$, lo que quiere decir que los sistemas agroforestales tienen altas tasas de crecimiento pero los bosques siguen siendo los sistemas que más carbono llegan a acumular.

Al comparar cultivos de café y los cafetales con sombra, se observa que las remociones de los cafetales apenas supera las 3.500 $Mg \cdot CO_2e$, mientras que los cafetales con sombra llegan a remover 154.477 $Mg \cdot CO_2e$. La biomasa de los cafetales no aumenta como el resto de las formaciones arbóreas debido al manejo que se practica en estos cultivos de frecuentes podas para mantener la renovación de los tallos fértiles.

La implementación de plantaciones con especies nativas en pastos, dentro del escenario de restauración de corredores riberanos, provocan emisiones cercanas a 300 Mg·CO_2e durante el primer año del proyecto, sin embargo a partir del segundo año, las remociones asciende a 858 Mg·CO_2e. En el escenario de aumento de la conectividad biológica, la conversión del cultivo de caña de azúcar a cafetales con sombra, emite durante el primer año 20.390 Mg·CO_2e, viéndose compensadas durante el segundo año con remociones que superan los 5.000 Mg·CO_2e. Ecológicamente, esto se debe a la gran cantidad de carbono del suelo que es liberado al implementar estas actividades, por cambiar de sistemas con altos contenidos de carbono en el suelo a otros con otra distribución del carbono en el ecosistema, siendo la relación raíz-tallo de 1,60 para pastos y cultivos de caña, pasando a 0,42 tanto para las plantaciones como para los cafetales con sombra. Es decir, los pastos almacenan mayor cantidad de carbono en las raíces que las plantaciones y los cafetales con sombra.

Esto mismo ocurre en el escenario de manejo sostenible de la tierra, donde el cambio de pastos a sistemas silvopastoriles emite cerca de 200.000 Mg· CO_2e y la conversión de cultivos de café a cafetales con sombra emite del orden de 46.000 Mg· CO_2e. Este efecto se debe a que el crecimiento de los árboles establecidos es más lento, y por lo tanto la captura del CO_2, que las pérdidas del mismo. En estos dos casos las emisiones no llegan a equilibrarse hasta el sexto año del proyecto. Esto no implica que estos cambios de uso de la tierra sean contraproducentes, simplemente que el balance de carbono no se vuelve positivo hasta transcurridos 6 años. *A priori* estos resultados pueden parecer no deseados pero se debe tener en cuenta las ventajas que proporcionan los sistemas agroforetales, no tanto en la captura de carbono al principio del proyecto, sino también en los servicios ecosistémicos.

7. CONCLUSIONES

- El tipo de bosque que más carbono almacenado registró fueron las áreas de bosque primario, siendo esta diferencia de un 35% más que los bosques secundarios. Lo que quiere decir que los bosques secundarios aún tiene potencial de acumular carbono y van a depender del estado de madurez o edad del bosque.

- La zona de vida con mayor acumulación de carbono son aquellas de mayor altitud, concretamente el bosque pluvial montano bajo, para los bosques primarios, y para bosques secundarios corresponde al bosque pluvial montano, montano bajo y el bosque muy húmedo premontano de menor altitud.

- La menor acumulación de carbono se encuentra en los bosques muy húmedos tropicales transición a premontano en bosques primarios, y en bosque muy húmedo premontano en bosques secundarios.

- Dentro de las pasturas activas del corredor con el mismo manejo podemos distinguir promedios diferentes de acumulación de carbono según la altitud. Los pastos de mayor altura acumulan menos carbono que los pastos a menor altura.

- Los pastos con mayores tasas de acumulación de carbono son aquellos correspondientes a la zona de vida de bosque muy húmedo premontano. Mientras que la menor acumulación corresponde a las zonas de vida de bosque muy húmedo montano bajo y bosque pluvial premontano.

- Los cambios de usos de la tierra en función de los tres escenarios propuestos aumentarían las remociones netas de GEI en el CBVC-T.

- La conversión de los pastos con manejo tradicional y los cultivos de caña a sistemas silvopastoriles, plantaciones o sistemas agroforestales producirían emisiones en los primeros años de su implementación, pero serán compensadas al cabo de los años, siendo el balance final positivo.

8. DISCUSIÓN GENERAL

El presente trabajo pretendió cuantificar el carbono almacenado arriba del suelo en diferentes usos de la tierra en el Corredor Biológico Volcánica Central-Talamanca y su flujo bajo futuras. Este trabajo es basado en otras investigaciones sobre la cualificación de carbono de algunos usos de la tierra para su interpolación a toda la extensión de corredor, además de las nuevas aportaciones sobre la acumulación de carbono en otros usos de la tierra hasta entonces no estudiados en la zona.

Los resultados obtenidos para las áreas de bosque fueron satisfactorios al poder discernir la acumulación de carbono en distintos rangos de altitud, los cuales se agruparon de tal manera que caracterizando las zonas de vida del corredor. Algunos de estos resultados fueron comparados con aquellos reportados por estudios estratificados en base a las zonas de vida, obteniéndose conclusiones similares. El estudio de los sistemas pastoriles es la parte más novedosa del estudio, por no haberse realizado ningún estudio tan exhaustivo de este sistema en la zona. Los resultados nos permiten diferenciar las distintas acumulaciones de carbono en al biomasa aérea según la tipología del pasto y la altura. La adaptación de unas especies u otras se ve influenciado por las condiciones climatológicas, siendo éstas las determinantes en la tasa de crecimiento de los plantas, lo que resulta nuevamente que los resultados se ven estratificados según las zonas de vida del corredor. Jobse (2008), concluyó las zonas de vida son más influyentes en la acumulación de carbono en pasturas que la edad de la pastura o el antiguo uso del suelo.

Es por esto que se puede concluir que la variabilidad climática es el factor determinante en las diferencias de crecimiento y por lo tanto en la acumulación de carbono en la biomasa de los distintos ecosistemas.

Como era de esperar los ecosistemas boscosos son aquellos que acumulan más cantidad de carbono en la biomasa aérea y en su extremo opuesto encontramos las pasturas con manejo tradicional. Sin embargo, no se debe subestimar el potencial que puede llegar a tener los sistemas silvopastoriles si, mediante un buen manejo de las pasturas y la mejora de la estructura del sistema con la implementación de árboles dispersos y cercas vivas, conseguimos aumentar los “pools” de carbono. Esto se debe a

que los árboles son los sumideros por excelencia de la biomasa aérea y la conservación de grandes árboles dispersos en potreros en las zonas de vida de bosques pluvial premontano y húmedo premontano, el sistema puede llegar a alcanzar acumulaciones de carbono por hectárea similares a las de un bosque seco tropical protegido (Jobse, 2008).

En todo momento se remarca el factor limitante del estudio en cuanto a las variables del ecosistema estudiadas. Los árboles son una de los mayores sumideros de CO_2, pero no hay que olvidar que el suelo, y sobretodo la capa más superficial (Cifuentes, 2008) es un reservorio tan importante como el otro, sobretodo en los sistemas pastoriles.

Otra parte del trabajo fue la estimación de las remociones futuras, objetivo muy importante dentro del contexto del cambio climático y por supuesto de la mitigación del mismo. Los resultados obtenidos nos indican que es un trabajo a largo plazo que se debe hacer en conjunto. Las emisiones obtenidas al principio de las implementaciones del proyecto nos dan una visión temporal del ritmo al que la alternativa a la mitigación del efecto invernadero se desarrolla mediante la captura del dióxido de carbono por la vegetación. Además, como se pudo remarcar, la cantidad de carbono total almacenada depende de la extensión y densidad de carbono de los distintos sumideros, y es por esto que el trabajo debe ser común, a la escala del Corredor, entre todos los productores y a mayores escalas debe de existir una reacción y cooperación de la comunidad regional e internacional.

El en estudio de Cifuentes (2008), se estimó que para el 2100 habrá una disminución en las precipitaciones y un aumento en la temperatura que causarán disminuciones en la acumulación de carbono en la biomasa de los bosques primarios. El estudio sugiere que esta disminución puede ser contrarestada por la implementación de bosque secundario. Para ello debería comenzarse con una reforestación de muchas zonas del país para poder evitar este efecto no deseado. Tomando como ejemplo las alternativas propuestas en los distintos escenarios podrían ser llevadas a cabo en muchas otras zonas, incrementando así no sólo el potencial de acumulación de carbono, sino otras ventajas y servicios que proporcionan algunos de estos ecosistemas.

Es por esto que los PSA tienen como función promover la motivación de la población a adoptar estas alternativas de uso de la tierra. Sanchez-Azofifa et *al.,* (2007), mostraron que el impacto de los PSA sobre la deforestación no generaron resultados muy significativos, y Pagiola et *al.* (2007) que la conversión de los sistemas tradicionales a silvopastoriles o agroforetales, es limitada. Esto se debe a que los productores ven los servicios ecosistémicos externos a la productividad de sus propiedades y no conocen los beneficios que estos pueden producir.

La utilidad de este trabajo se apoya en la necesidad de invertir esfuerzos en la promoción del buen manejo y practicas de la tierra mediante la implementación de los PSA con el fin de aumentar la confianza y conocimiento entre los productores en estas prácticas.

9. RECOMENDACIONES

Los trabajos futuros en este ámbito y concretamente en la zona del CBVC-T, deberían ampliar este estudio con la estimación de los demás componentes de los ecosistemas ya que éste sólo se basó en la biomasa aérea. Una investigación complementaria a ésta, podría ser el estudio del carbono acumulado en el suelo y en la biomasa subterránea de las pasturas y bosques.

Las ecuaciones alométricas utilizadas para el cálculo de biomasa arbórea son de carácter general. En un principio se intentó afinar la estimación buscando ecuaciones por especie, y en su defecto por género. Pero la complejidad de las formaciones boscosas tropicales, dónde podemos encontrar unas 500 especies diferentes por hectárea, impidieron el cálculo exhaustivo de la biomasa aérea. Existen numerosas ecuaciones de distintas especies tropicales, pero todavía hay un gran trabajo por hacer.

Además la fracción de carbono de la biomasa utilizada es la recomendada por la IPPC, pero para afinar más los cálculos podría estimarse y en el caso de la vegetación encontrada en los pastos, podría obtenerse una fracción de carbono para cada tipología de pasto principal en la zona.

El cálculo de la biomasa aérea de pasturas, sólo fue realizado en una época del año, por lo que sería interesante el monitoreo a lo largo del año productivo para ver como incide la variabilidad climática con el stock de carbono.

10. BIBLIOGRAFIA

Andrade H.J.; Brook R.; Ibrahin M. 2008. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. Plant Soi (2008) 308: 11-22.

Avila, G. 2000. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas de café bajo sombra, café a pleno sol, sistemas silvopastoriles y pasturas a pleno sol. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.

BeerJ.; Harvey C.A.; Ibrahim M.; Harmand J.M.; Somarriba E. Jiménez F. 2003. Funciones de servicio de los sistemas de agroforestería. XII Congreso Forestal Mundial, Québec City, Canadá. 2003.

Bermeo Estrella D. 2010. Determinación y caracterización de tipos funcionales de plantas (TFPs) en bosques secundarios dentro de un gradiente actitudinal y su relación con variables bioclimáticas. Tésis MSc CATIE. Turrialba, Costa Rica. Pp. 126

Bronstein, G.E. 1984. Producción comparada de una pastura de Cynodon plectostachyus asociada con árboles de Cordi alliodora, con árboles de Erythrina poeppigiana y sin árboles. Tésis MSc CATIE. Turrialba, Costa Rica. Pp. 39

Callo-Concha D.; Krishnamurthy L.; Alegre J. 2002. Secuestro de carbono por sistemas agroforestales amazónicos. Revista Chapingo. Seria ciencias forestales y del ambiente, julio-diciembre año/vol. 8, nº 002. Universidad Autonómica de Chapingo, Chapingo México pp. 101-106.

Campos J.J.; Ortiz R. 1999. Capacidad y riesgo de actividades forestales en el almacenamiento de carbono y conservación de biodiversidad en fincas privadas del área central de Costa Rica. . Serie Técnica. Reuniones Técnicas (CATIE).no. 5. 6-9 Abr 1999. Turrialba (Costa Rica).1999. Pp. 291-295.

Canet Densati L. 2008. Corredor Biológico Volcánica Central- Talamanca. Perfil Técnico. CATIE, TNC. Turrialba, CR. Pp 4-97.

Cardona Velásquez L.C.; Monsalve Marín C. A. 2009. Evidencias paleoecológicas del manejo del bosque subandino. Ocupaciones humanas durante el Holoceno en la cuenca media del río Porce (Antioquia, Colombia) Boletín de Antropología, vol. 23, núm. 40, 2009, pp. 229-258

Casasola F.; Ibrahim M.; Villanueva C.; López M. 2010. Impacto de la variabilidad climática sobre la productividad de leche y los medios de vida de productores ganaderos de Santa Cruz de Turrialba. Costa Rica. Informe técnico del VI Congreso latinoamericano: agroforestería para la producción pecuaria sostenible. Multiplicación de los sistemas agroforestales y silvopastoriles para la adaptación y mitigación del cambio climático en Territorios ganaderos. Panamá Septiembre 28-30, 2010. Pp. 10.

Chave J.; Andalo C.; Brown S.; Cairns M.A.; Chambres J.Q.; Eamus D.; Fölster H.; Fromard F.; Higuch N.; Kira T.; Lescure J.-P.; Nelson B.W.; Ogawa H.; Puig H.; Riéra B.; Yamakura T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Oecologia (2005) 145: 87–99

Chaves M. 1996. Distribución del área cultivada con caña de azúcar en Costa Rica, según región agrícola y tamaño de la unidad productiva. X Congreso Nacional 1996. Resumen 97.Pp. 367

Chaves M. 1999. Nutrición y fertilidad de la caña de azúcar en Costa Rica. XI Congreso Nacional Agronómico/III Congreso Nacional de Suelos. Pp. 193-214.

Cifuentes-Jara M. 2008. Aboveground Biomass and Ecosystem Carbon Pools in Tropical Secondary Forests growing in six life zones of Costa Rica. Dissertation Doctoral. Oregon State University. Corvallis, Oregon, EE.UU. Pp. 178

Dpto. de desarrollo sostenible de la Organización de los Estados Americanos. 2005. Pagos por servicios ambientales. Documento desarrollado para el taller de expertos sobre el apoyo al Desarrollo Sostenible a través de la Agricultura, la Silvicultura y el Turismo. 2 de Nov. 2005 San José, Costa Rica. Pp. 5

Estrada Carmona N.2009. Identificación de áreas prioritarias en la oferta de servicios ecosistémicos para establecer esquemas de Pagos (PSA) direccionados, Costa Rica. Tesis MSc CATIE. Turrialba, Costa Rica. Pp 92

Fonseca Q. P., 2010. Cambio climático afectará producción de caña de azúcar. La Nación 16/08/2010.

Godoy J.C.; Kanninen M.; Ramírez O.; Gómez M. 1999. Análisis de los programas de incentivos a la reforestación implementados en Costa Rica. Serie Técnica. Reuniones Técnicas (CATIE).no. 5. 6-9 Abr 1999. Turrialba (Costa Rica).1999. p. 392-395

González Martínez A.J. 2007. Flujos de nutrientes y sus implicaciones para la sostenibilidad en sistemas silvopastoriles con y sin Arachis pintoi en Muy Muy, Nicaragua. Tesis MSc CATIE. Turrialba, Costa Rica. Pp 66-70.

Hall J. S.; Ashton M. S.; Garen E.J.; Jose S. 2011. The ecology and ecosystem service of native trees: Implications for reforestation and land restoration in Mesoamerica. Forest Ecology and Management 261 (2011) 1553- 1557.

Heyman J.; Ariely D. 2004. Effort for Payment. A tale of two Markets. Psychological Science. Volume 15- Number 11, 2004. Pp. 787-793

Holling C.S. and Meffe G.K. 1996. Command and Control and the Pathology of natural resource management. Essays. Conservation Biology. Volume 10, No. 2, April 1996, Pages 328-337

Hughes, R.F., Kauffman, J.B.; Watson, V.; Liu, S.; Cifuentes-Jara, M.; Jobse, J.J.; Tosi, J. 2010. Patterns of carbon and nitrogen storage in mature forests across life zones of Costa Rica. Submitted to Ecological Applications.

Ibrahim M.; Schlönvoigt A. 1999. Silvopastoral Systems for degraded lands in the humid tropics. Environmentally friendly silvopastoral alternatives for optimising productivity of livestock farms: CATIE's experience. Serie Técnica. Reuniones Técnicas (CATIE).no. 5. 6-9 Abr 1999. Turrialba (Costa Rica).1999.p. 277-282.

Ibrahim M.; Guerra L.; Casasola F.; Neely C. 2010. Grassland carbon sequestration: Management, policy and economics. Integrated Crop Management. FAO. Vol 11-2010. Pg. 189- 195.

Ibrahim M. 2011. Producción y productividad de las pasturas. Curso Silvopastoril. Abril 2011. p. 30.

IPCC, 2000. IPCC, 2000 - Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo and David J. Dokken (Eds.). Land Use, Land-Use Change and Forestry. Cambridge University Press, UK. pp 375

IPCC, 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 442

IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M.

Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Pp. 996

Karsenty, A., 2011. Titre du papier. Conférence IDDRI, Les instruments de marché pour la biodiversité: la nature à tout prix?, Paris, 8 juin 2011.

Jiménez, M.; Ramos Z. 2009. Anuario 2009. Bosque Modelo Reventazón. Bosque Modelo de Iberoamérica. Pp. 8

Jobse J. 2008. Impacts of Forest-to-Agriculture Conversion on Aboveground and Soil Carbon and Nitrogen Stocks along a Bioclimatic Gradient in Costa Rica. A Dissertation submitted to Oregon State University. Pp. 208

Mascaro J.; Asner G.P.; Muller-Landau H.C.; Van Breugel M.; Hall J.; Dahlin K. 2011. Controls over aboveground forest carbon density on Barro Colorado Island, Panama. Biogeosciences, 8, 1615-1629.

Montagnini F.; Guariguta M. Ribeiro N.; Mariscal A. 1999. Regeneración natural en plantaciones puras y mixtas de especies nativas. Serie Técnica. Reuniones Técnicas (CATIE).no. 5. 6-9 Abr 1999. Turrialba (Costa Rica).1999.p. 324-327.

Montagnini F. 2004. Plantaciones forestales con especies nativas, una alternativa para la producción de madera y la provisión de servicios ambientales Recursos Naturales y Ambiente (CATIE). Nov 2004. no. 43 p.28-35.

Montero G.; Ruiz-Peinado R.; Muñoz M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO_2 por los bosques españoles. Monografías INIA: serie forestal. Nº13-2005. Pp.13-20.

Mora Calvo 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. Tésis MSc CATIE. Turrialba, Costa Rica. Pp.106

Moreno Díaz M.L. 2005. Pagos por Servicios Ambientales, la experiencia de Costa Rica. Informe presentado al Instituto Nacional de Biodiversidad INBIO. 29-09-2005. Pp. 24.

Murrieta Arévalo E. 2006. Caracterización de cobertura vestal y propuesta de una red de conectividad ecológica en el Corredor Biológico Volcánica Central- Talamanca, Costa Rica. Tesis MSc CATIE. Turrialba, Costa Rica. Pp.141

Musálem S. M. A. 2001. Sistemas agrosilvopastoriles. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias Forestales. Pp. 120

Návar J. 2008. Biomass component equations for Latin American species and groups of species. Ann. For. Sci. 66 (2009) 208

Nieuwenhyse A.2010. Lecciones aprendidas en recuperación de tierras de pasturas degradadas. Informe técnico del VI Congreso latinoamericano: agroforestería para la producción pecuaria sostenible. Multiplicación de los sistemas agroforestales y silvopastoriles para la adaptación y mitigación del cambio climático en Territorios ganaderos. Panamá Septiembre 28-30, 2010. Pp. 7.

Neumann-Cosel L.; Zimmermann B.; Hall J. S.; Van Breguel M.; Elsenbeer H. 2011. Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures- A case study from Panama. Forest Ecology and Management 261 (2011) 1625-1633

Larousse, 1996. Enciclopedia Larousse.

Le MONDE, 2011. Les émissions de CO2 ont atteint un niveau record en 2010. Journal d'information en ligne, LEMONDE.FR avec AFP | 30.05.11 | 08h18 • Mis à jour le30.05.11|12h14
http://www.lemonde.fr/imprimer/article/2011/05/30/1529142.html

Leff E. 2002. "La Geopolítica de la Biodiversidad y el Desarrollo Sustentable : economización del mundo, racionalidad ambiental y reapropiación social de la

naturaleza", La Guerra Infinita: Hegemonía y terror mundial. Emir Sader y A. E. Ceceña. Pp. 280.

Ley 7554. Ley Orgánica del Ambiente. La Gaceta Nº 215 del 13 de Noviembre de 1995. Disponible: http://www.ccad.ws/documentos/legislacion/CR/L-7554.pdf

Ley 7575. Ley Forestal, Costa Rica. La Gaceta Nº 72 del 16 de abril de 1996.

Lopez Musalem A.; Schlönvoigt A.; Ibrahim M.; Kleinn C.; Kanninen M. 1999. Cuantificación del carbono almacenado en un sistema silvopastoril en la zona atlántica de Costa Rica. Agroforestería en las Américas (CATIE). 1999. v. 6(23) p. 51-53.

Ortiz A.; Riascos L.; Somarriba E. 2008. Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de caco (Theobroma caco) y laurel (Cordia alliodora). Agroforestería en las Américas Nº 46 2008, pp. 26-29.

Ortiz R.; Kanninen M. Evaluación económica del servio de sumidero de carbono en diferentes ecosistemas forestales. Serie Técnica. Reuniones Técnicas (CATIE).no. 5. 4. Semana Científica. Turrialba (Costa Rica). 6-9 Abr 1999. Turrialba (Costa Rica).1999. Pp. 401-404

Pagiola S.; World Bank. 2006. Payments for Environmental Services in Costa Rica. PRA (Munich Personal RePFc Archive) Online at http://mpra.ub.uni-uenchen.de/2010/MPRA Paper No. 2010, posted 07. November 2007 / 02:09.

Pearson T.; Walker S.; Brown S. 2006. Guidebook for the formulation of afforestation and reforestation projects under the Clean Development Mechanism. ITTO Technical Series 25. Pp. 61

Protocolo de Kyoto. 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Kyoto, Japan 1997. Pp. 25

Raich W. J.; Russel A. E.; Kitayama K.; Parton W. J. ; Vitousek P. M. 2006. Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests. Ecology, 87(1), 2006, pp. 76-87

Romero Vargas J.C. 2009. Metodología para estimar la remoción y la reducción de gases efecto invernadero por prácticas de manejo mejoradas en pastizales bajo el Estándar de Carbono Voluntario. Tesis MSc CATIE. Turrialba, Costa Rica. Pp. 9-30

Rügnitz, M. T.; Chacón, M. L.; Porro R. 2009. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales -- 1. ed. -- Lima, Perú.: Centro Mundial Agroflorestal (ICRAF) / Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). 2009. 79 p.

Sánchez- Azofeifa, G. A.; Harris R. C.; Skole D. L. 2001. Deforestation in Costa Rica: A quantitative análisis using remote sensing imagery. Biotropica, Vol. 33, No. 3 (Sep., 2001), pp. 378-384

Sánchez- Azofeifa, G. A.; Praff A. ; Robalino J. A.; Boomhower J. P. 2007. Costa Rica's Payment for Environmental Services Program: Intention, Implementation and Impact. Conservation Biology. Vol. 21, Nº 5, 1165-1173

Salas Macías C. A. 2011. Comportamiento hidrológico y erosivo en usos de suelo prioritarios de la campiña lechera en Santa Cruz, Turrialba, Costa Rica. Tesis MSc CATIE. Turrialba, Costa Rica. Pp. 16; 25

Salgado Vásquez J. 2010. Fijación de carbono en biomasa aérea y rentabilidad financiera de sistemas agroforestales con café en Turrialba, Costa Rica y Masatepe, Nicaragua. Tesis MSc CATIE. Turrialba, Costa Rica. Pp 126

Schroth G.; da Fonseca G. A. B; Harvey C. A.; Gascon C.; Vasconcelos H.; Izac A. M.; Angelsen A.; Finegan B.; Kaimowitz D.; Krauss U.; Laurance S.G. ; Laurance W. F.; Nasi R.; Naughton-Treves L.; Niesten E.; Richardson D. M. Somarriba E.; Tucker N.; Vicent G. & Wilkie D. 2004. Agroforestry and biodiversity

conservation in tropical landscapes. Ed Schroth G.; da Fonseca G. A. B; Harvey C. A.; Gascon C.; Vasconcelos H.; Izac A.M. USA. pp. 523

Schuur. E. A. G et Matson P. A. 2001. Net primary productivity and nutrient cycling across a mesic to wet precipitation gradient in Hawaiian montane forest. Oecologia (2001) 128: pp. 431-442

Shepherd D.; Montagnini F. 1999. Acumulación de carbono en plantaciones mixtas y puras en el trópico húmedo. Serie Técnica. Reuniones Técnicas (CATIE).no. 5. 4. Semana Científica. Turrialba (Costa Rica). 6-9 Abr 1999. Turrialba (Costa Rica).1999. Pp. 345-349.

Somarriba, E.; J. Andrade. Hernán; Segura Milena; Villalobos Marilyn 2008. ¿Cómo fijar carbono atmosférico, certificarlo y venderlo para complementar los ingresos de productores indígenas en Costa Rica?. Agroforestería en las Américas Nº 46 2008. Pp. 81-88.

Stern, N., S. Peters, V. Bakhshi, A. Bowen, C. Cameron, S. Catovsky, D. Crane, S. Cruickshank, S. Dietz, N. Edmonson, S.-L. Garbett, L. Hamid, G. Hoffman, D. Ingram, B. Jones, N. Patmore, H. Radcliffe, R. Sathiyarajah, M. Stock, C. Taylor, T. Vernon, H. Wanjie, and D. Zenghelis . 2006. Stern Review: The Economics of Climate Change, HM Treasury, London.

Tothill, JC; Hargreaves, JNG; Jones, RM; McDonald, CK. 1992. A comprehensive sampling and computing procedure for estimating pasture yield and composition. Queensaland, Australia, CSIRO. 23 p.

Wunder S. 2005. Pagos por servicio ambientales: Principios básicos esenciales. CIFOR Occasional Paper Nº. 42 (S). Pp 1-32.

ANEXOS

Ejemplo de la ficha de campo utilizada en la práctica del botanal, fase no destructiva.

Finca: Felipe Rivera Fecha: 4-3-2001 Aparto: 1 María abajo

Muestra Visual	Disponibilidad Pasto (1→5)	Suelo desnudo %	Cobertura %	Brachiaria %	Cynodon Estrella %	Otros %
1	4	-	100	100		
2	3	-	100	100		
3	2	-	100	100		
4	1	-	100	100		
5	4	-	100	100		
6	2	-	100	100		
7	3	-	100	100		
8	4	-	100	100		
9	4	30	70	100		
10	3	-	100	100		
11	4	-	100	100		
12	4	-	100	100		
13	5	-	100	100		
14	3	-	100	100		
15	4	-	100	100		
16	3	10	90	100		
17	2	-	100	100		
18	1	-	100	100		
19	3	-	100	100		
20	4	-	100	100		
21	4	-	100	100		
22	5	-	100	100		
23	5	-	100	100		
24	5	-	100	100		
25	3	-	100	100		
26	4	-	100	100		
27	4	-	100	100		
28	4	-	100	100		

29	4	-	100	100		
30	5	-	100	100		

Finca: Felipe Rivera Fecha: 4-3-2001 Aparto: 1 María abajo

Muestra real	Código	Peso verde biomasa aérea	Peso verde tallos	TOTAL	Índice Visual
1	FR A1 M1 V1	280	200	480	2
1	FR A1 M10 V1				
2	FR A1 M9 V1	410	280	690	3
2	FR A1 M V2	500	280	780	
3	FR A1 M2 V3	680	410	1090	7
3	FR A1 M3 V3	850	210	1060	
4	FR A1 M7 V4	800	300	1100	13
4	FR A1 M5 V4	560	550	1110	
5	FR A1 M4 V5	720	570	1290	5
5	FR A1 M	1140	260	1400	

Fecha de recogida de las primeras muestras: 4-3-2011

Fecha de entrada del ganado: Domingo

Fecha de recogida de las segundas muestras: Lunes 7 -3-2011

Superficie del aparto:

Código: FR A1 Mx Vx

Días en reposo: 22 días aprox.

Cuadro27: Zonas de vida, localización y clima de los bosques muestreados.

Table 1. Life Zone, location and climate data of sampled forest sites. Mean annual precipitation values (MAP) as well as mean, minimum, maximum, and annual temperature values (MAT, Min. AT and Max. AT) were averaged from monthly values.

Life Zone	Site name	Location	Elevation a.s.l (m)	MAP (mm)	Mean AT (°C)	Min. AT (°C)	Max. AT (°C)
Tropical	Meseta	10 ° 50.91N; 85 °	290	1950	25.5	20.8	30.3
Dry	Pacifica 1	10 ° 27.84N; 85 ° 7.64W	63	1905	26.1	21.5	30.7
	Pacifica 2	10 ° 27.89N; 85 ° 7.68W	73	1905	26.1	21.5	30.7
	Pacifica 3	10 ° 28.56N; 85 ° 9.51W	40	1940	26.0	21.4	30.7
	Rodores	10 ° 51.12N; 85 °	280	1950	25.5	20.8	30.3
Tropical	Jobada	9 ° 46.49N; 84 ° 56.32W	32	2305	26.8	21.3	32.3
Moist	Carara 1	9 ° 49.91N; 84 ° 33.68W	40	2155	25.1	20.7	29.5
	Carara 2	9 ° 49.93N; 84 ° 33.71W	35	2155	25.1	20.7	29.5
	Killer	9 ° 46.92N; 84 ° 55.84W	37	2260	26.7	21.2	32.2
	Punta Blanca	9 ° 46.49N; 84 ° 57.14W	35	2295	26.8	21.3	32.3
Tropical	Osa 1	8 ° 24.16N; 83 ° 19.00W	160	3975	24.0	18.0	29.9
Wet	Osa 2	8 ° 24.49N; 83 ° 20.10W	45	4055	24.0	18.0	29.9
	Osa 3	8 ° 24.70N; 83 ° 19.90W	160	3985	24.0	18.1	29.9
	Gallo Pinto	10 ° 28.93N; 83 °	40	4335	23.3	18.9	27.7
	La Bonita	10 ° 29.93N; 83 °	45	4315	23.1	18.8	27.3
	Maria Luisa	9 ° 53.04N; 83 ° 06.27W	180	3270	25.0	21.0	29.0
	Magsasay	10 ° 24.18N; 84 °	175	3920	23.0	19.1	27.0
Premontane	SSO-La Selva	10 ° 25.55N; 84 °	80	3880	24.6	20.0	29.2
Wet	Holdridge	10°.24.971N; 84 °	44	3935	24.8	20.1	29.5
Transition	La Muerte	10 ° 38.154N; 84 °	133	3285	22.4	18.8	26.0
	Rodeo	9 ° 54.41N; 84 ° 16.49W	960	2270	23.0	17.8	28.3
Premontane	Las Alturas	8 ° 56.86N; 82 ° 49.91W	1540	3820	21.1	15.6	26.6
Wet	Mary	10 ° 18.04N; 84 °	1370	3115	20.0	15.9	24.1
	Old Road	8 ° 56.83N; 82 ° 49.82W	1493	3825	21.0	15.3	26.6
Premontane	Miranda	10 ° 15.98N; 84 °	1020	3990	17.2	13.5	21.0
Rain	Penas Blancas	10 ° 17.75N; 84 °	1300	3115	20.0	15.9	24.1
	Saino	10 ° 17.56N; 84 °	1145	3040	20.6	16.6	24.7
	Kraven	10 ° 15.87N; 84 °	1040	4545	18.1	14.8	21.4
Lower	Nubosa	10 ° 18.88N; 84 °	1495	3430	20.3	16.4	24.3
Montane	Pittier	9 ° 01.65N; 82 ° 57.74W	1790	3565	22.5	17.1	27.9
Rain	Valle	10 ° 18.90N; 84 °	1640	3115	20.0	15.9	24.1
	Trinidad	9 ° 39.62N; 83 ° 51.98W	2440	2630	16.3	11.0	21.6
	Mon-Bellbird	10 ° 12.42N; 84 °	1730	3990	17.2	13.5	21.0
	One world	10 ° 18.14N; 84 °	1350	3040	20.4	16.4	24.4

Fuente: Hughes et *al.* 2010.

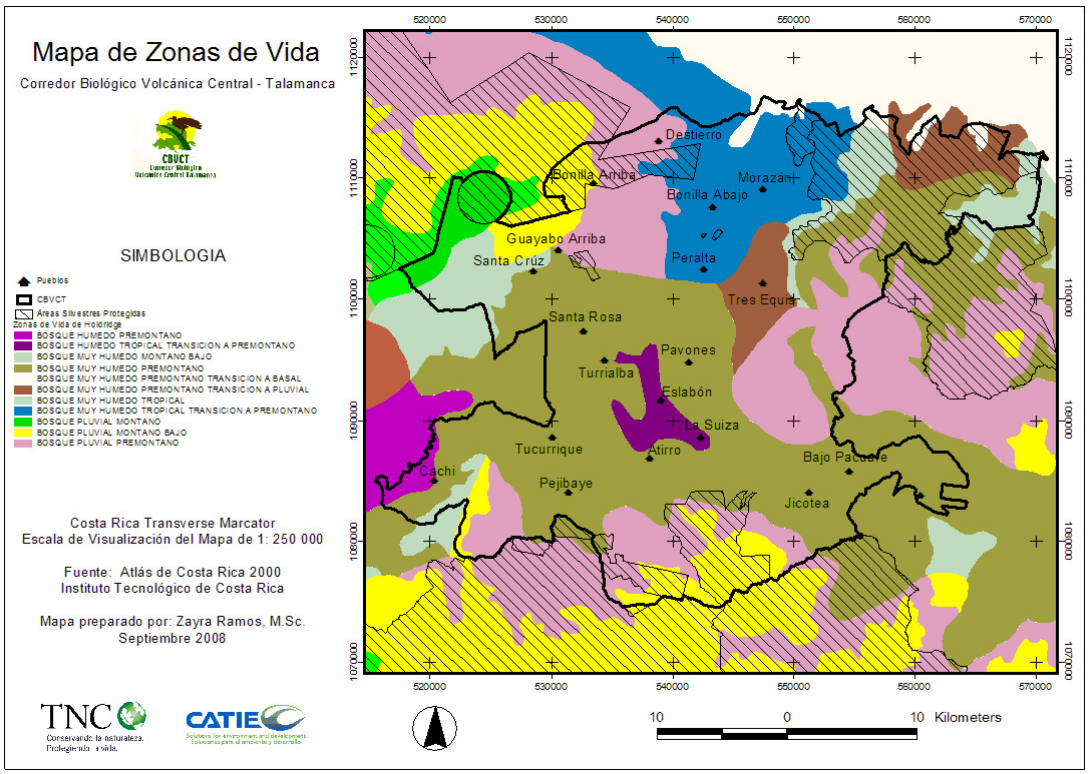

Figura 18: Distribución de las zonas de vida del CBVC-T. Fuente: Canet 2008.