

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/265850408>

# Captura de carbono en comunidades forestales de San Andrés, Talpa de Allende, Jalisco

Chapter · January 2013

CITATIONS

0

READS

835

2 authors:



[Viacheslav Shalisko](#)

University of Guadalajara

50 PUBLICATIONS 110 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[José Antonio Vázquez-García](#)

University of Guadalajara

211 PUBLICATIONS 1,853 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

## 8.2 Captura de carbono en ecosistemas forestales de San Andrés, Talpa de Allende, Jalisco

Viacheslav Shalisko, J. Antonio Vázquez-García

### RESUMEN

Se evaluó la captura del CO<sub>2</sub> atmosférico en bosques naturales del Ejido San Andrés, municipio Talpa de Allende, Jalisco. Se estudió una superficie de 8116 ha con vegetación natural en diferentes estados de conservación. Los ecosistemas evaluados incluyeron bosque mixto de *Quercus* y *Pinus*, bosque de *Quercus*, bosque mesófilo de montaña y bosque de galería. Con base en composición florística y medición forestal en 6 sitios de muestreo de 0.1 ha se realizó la estimación de biomasa de productores primarios en dichos ecosistemas. Para la estimación de biomasa se empleó el método de ecuaciones alométricas. La biomasa aérea de vegetación fluctuó de 77 Mg/ha (bosque mixto de *Quercus* y *Pinus* perturbado) hasta 407 Mg/ha (bosque mesófilo de montaña). Para el análisis de captura de CO<sub>2</sub> por ecosistemas, se empleó un modelo de flujos de carbono durante crecimiento del bosque natural, basado en las curvas empíricas de crecimiento, modelos de regeneración y mortalidad de arbolado en condiciones naturales. Se analizaron cuatro escenarios de manejo de ecosistemas en el Ejido y sus efectos en captura del dióxido de carbono y su almacenamiento. El escenario "línea base" contempló el crecimiento del bosque natural en las mismas condiciones que las actuales, con presión de prácticas de aprovechamiento forestal en el Ejido similares a las permitidas en el periodo 1999-2009. Los otros escenarios fueron exclusión de aprovechamiento forestal, exclusión de deforestación y plantación de árboles endémicos de *Populus guzmanatlanensis* en los sitios deforestados a lo largo de arroyos. La simulación de captura de carbono en estos escenarios indicó posible ganancia (adicionalidad) en captura de 4,312 Mg CO<sub>2</sub> por año en caso de abandono del aprovechamiento forestal y otros 890 Mg CO<sub>2</sub> en caso de suspender la deforestación. Los niveles de adicionalidad determinados no permiten factibilidad económica del proyecto de captura de carbono en el Ejido San Andrés bajo términos del Mecanismo de Desarrollo Limpio, debido a los precios actuales en el mercado de bonos de carbono.

Palabras claves: captura de CO<sub>2</sub> atmosférico por vegetación natural, biomasa, modelación de ecosistemas, adicionalidad, Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

### ABSTRACT

Atmospheric CO<sub>2</sub> capture in natural forests was evaluated in 8116 ha of forest surface of Community San Andrés, municipality of Talpa de Allende, Jalisco. Studied ecosystems present variety of conservation conditions and include mixed *Quercus* and *Pinus* forest, *Quercus* forest, cloud forest and gallery forest. Biomass of ecosystem primary producers was estimated in base of floristic analysis and forest measuring in 6 sampling sites of 0.1 ha each. Method of allometric equations was used for biomass calculations. Estimated aerial biomass vary from 77 Mg/ha (perturbed mixed *Quercus* and *Pinus* forest) to 407 Mg/ha (cloud forest in glen). Analysis of CO<sub>2</sub> capture in ecosystems was possible using models of carbon fluxes in natural forest, of stand regeneration and mortality in natural conditions. Four ecosystem management scenarios were evaluated for San Andres Community, as well as their effects in CO<sub>2</sub> capture and storage. In the "base line" scenario natural forest growth was considered in the same conditions as actually, including forest harvesting practices similar to allowed in 1999-2009 period. Other scenarios exclude forest harvesting, deforestation and include stream banks afforestation with endemic *Populus guzmanatlanensis* trees. Carbon capture simulation in this scenarios indicated possible additionality of 4,312 Mg CO<sub>2</sub> per year in scenario without forest harvesting and additional 890 Mg CO<sub>2</sub> per year without deforestation. Levels of additionality determined does not allow economic factibility of carbon capture project under conditions of Clean Development Mechanism, due to current prices in carbon bones market.

Keywords: capture of atmospheric CO<sub>2</sub> by natural vegetation, biomass, ecosystem modeling, additionality, Clean Development Mechanism (CDM).

Es evidente la atención global de la comunidad científica y de la sociedad en general al problema del efecto invernadero del dióxido de carbono atmosférico. El calentamiento global observado durante el último siglo (Brohan *et al.*, 2006) forma parte del escenario de cambio climático global, supuestamente causado por las emisiones antropogénicas del CO<sub>2</sub>, aunque este factor no puede considerarse único (Hansen *et al.*, 2000; Hansen *et al.*, 2008). El papel del efecto invernadero del CO<sub>2</sub> en el calentamiento global fue considerado fundamental por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2008), formando parte del conjunto de las causas del cambio climático global. El incremento de la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera es consecuencia de uso de los combustibles fósiles a partir del inicio de la Era Industrial y su efecto en la termodinámica del planeta es retardado, severo y posiblemente irreversible en plazo de milenios. Particularmente, de acuerdo con las estimaciones de Solomon *et al.* (2009), el incremento de la concentración del CO<sub>2</sub> hasta valor pico de 450-600 ppm esperada en el escenario optimista para el siglo XXI, puede resultar en cambio climático irreversible, con un incremento de la temperatura promedio global en 1°-2°C con respecto a la temperatura actual aún 3000 años después del pico de concentración del gas invernadero. La captura del CO<sub>2</sub> atmosférico es una de las posibles estrategias de mitigación del efecto invernadero en el largo plazo (Metz *et al.*, 2005).

El dióxido de carbono participa en el ciclo del carbono (C), indudablemente el ciclo geobioquímico más importante para

existencia de la vida en la Tierra. Entre los servicios ambientales de los ecosistemas, el servicio de captura del CO<sub>2</sub> atmosférico por los organismos autótrofos es fundamental. La característica de la mayoría de los ecosistemas terrestres es su productividad primaria global (GPP) positiva, que consiste en la capacidad de extraer CO<sub>2</sub> de atmósfera por medio de fotosíntesis y transformarlo en biomasa (Begon *et al.*, 2006). El C secuestrado queda almacenado en la biomasa persistente en el ecosistema, que se incrementa en la misma medida que la productividad neta del ecosistema (NEP), hasta alcanzar el volumen máximo de biomasa posible para el ecosistema dado. El flujo del C a través de la biomasa cuenta con dos salidas principales: respiración y materia orgánica (MO) muerta. La mayor parte del CO<sub>2</sub> capturado regresa a la atmósfera en el corto plazo, como consecuencia de la respiración de los organismos autótrofos y heterótrofos que forman el ecosistema. Otra fracción del C persiste aún después de exclusión de la biomasa, gracias al carácter lento y parcial de descomposición de la MO. En la mayoría de los ecosistemas terrestres el almacén del C en la MO en descomposición y en materia orgánica de suelos (MOS) es superior a la cantidad del C en biomasa (Lorenz & Lal, 2010). El balance durante la descomposición de la MO está comprendido en su totalidad. Los procesos de descomposición, además de los procesos físico-químicos, incluyen la acción de animales, hongos y procariotas, y finalizan con la inmovilización de parte del carbono orgánico (CO) en los suelos. La persistencia del C en la MO de los suelos varía de décadas hasta miles de años, dependiendo del carácter de estabilización de los

compuestos orgánicos y este C queda excluido de la circulación a largo plazo (Berg & Laskowski, 2006; Lorenz & Lal, 2010). Los procesos de mineralización y fosilización en los suelos pueden causar exclusión permanente de parte del C cuando se trata de ciclos biogeoquímicos de corta duración.

La capacidad de secuestrar  $\text{CO}_2$  y almacenar C está en función del tipo de bioma. Los ecosistemas forestales son particularmente importantes por su alta capacidad de captura y almacenamiento del C. De acuerdo con los datos compilados en Lorenz & Lal (2010), en la escala global los ecosistemas de los bosques tropicales almacenan 206-389 Pg C en biomasa, 214-435 Pg C en la capa superior (hasta 1 m) del suelo, y capturan 0.72-1.30 Pg C anualmente; los ecosistemas de los bosques templados almacenan 73-159 Pg C en biomasa, 153-195 Pg C en la capa superior del suelo, capturando 0.37 Pg C anualmente. Finalmente, los ecosistemas de los bosques boreales cuentan con 78-143 Pg C en biomasa, 338 Pg C en la capa superior del suelo, capturando 0.49-0.70 Pg C por año. Luyssaert *et al.* (2008) estiman que los bosques templados y boreales primarios del Hemisferio Norte capturan  $1.3 \pm 0.5$  Pg C por año. De esta forma la cantidad del C almacenada en los ecosistemas terrestres forestales en escala global es de 1.3-2 veces mayor que la cantidad de C en forma de  $\text{CO}_2$  atmosférico, estimado en 817-828 Pg C para el año 2005 (Lorenz & Lal, 2010; Houghton, 2007).

Actualmente más que el 36% de la superficie forestal de la Tierra cuenta con los bosques primarios sin régimen de manejo, otros 53% son ecosistemas forestales modificados

(FAO, 2006). De acuerdo con el paradigma tradicional en ecología (e. g. Odum, 1969), los bosques viejos son neutrales en sentido de la captura de  $\text{CO}_2$ , porque la fotosíntesis en ecosistemas viejos está equilibrada con la respiración. Pero el paradigma tradicional desarrollado inicialmente para el caso de plantaciones forestales de carácter monoespecífico y con árboles de misma edad, no funciona para los bosques naturales. El análisis reciente de la productividad en los bosques primarios de diferentes edades obliga a revisar este paradigma (Suchanek *et al.*, 2004; Schulze, 2006; Luyssaert *et al.*, 2007; Luyssaert *et al.*, 2008). Según los resultados de investigación de Luyssaert *et al.* (2008), la capacidad de captura del C atmosférico no declina drásticamente con el envejecimiento de los ecosistemas forestales; en la mayoría de los casos los bosques mantienen la NEP positiva por siglos (e. g. hasta 800 años) cuando se encuentran en el estado clímax. En las condiciones naturales sin disturbios de gran escala, la mortalidad de los árboles es asincrónica y no necesariamente implica liberación del  $\text{CO}_2$  en la totalidad del ecosistema. En este caso, la tasa de liberación del  $\text{CO}_2$  por la descomposición de la MO de los árboles caídos es más baja que la captura de C durante la regeneración del bosque. Por siglos los ecosistemas forestales pueden mantener constante la relación entre la producción primaria neta y la respiración heterotrófica, con una NEP positiva, acumulando C en la biomasa y en el suelo. La condición necesaria para el mantenimiento de una acumulación continua de C consiste en la ausencia de mortalidad de los árboles en grandes extensiones y de disturbios locales para permitir la regeneración del bosque,

pero esto no se cumple en el régimen de disturbios propio de los bosques primarios sin manejo. La probabilidad acumulativa de disturbios que afectan a los ecosistemas en su totalidad (e. g. incendios forestales, plagas) incrementa con el tiempo; consecuentemente, los bosques viejos con un gran almacén del C son más raros en naturaleza que los ecosistemas jóvenes. Sin embargo, es posible coincidir con Luyssaert *et al.* (2008): los bosques primarios sin manejo son muy valiosos en términos de almacén y captura del C; entre más viejo es el bosque, más alto es el valor que representa.

Los acuerdos internacionales bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) incluyen el Protocolo del Kyoto del 1997 (UN, 1998), como el acuerdo principal que canaliza la aplicación de políticas de los gobiernos como respuesta al cambio climático global. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), juega el papel primordial en el desarrollo de estas políticas internacionales. El IPCC considera que los bosques son componentes significativos para considerarlos en las políticas de respuesta al cambio climático, por su importante almacén y flujos del C, y por importante grado de alteración antropogénica de los bosques. De acuerdo con el informe de síntesis del 2007 (Pachauri *et al.*, 2008), la contribución de la deforestación, la degradación de la biomasa y la turba en emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero fue de 8.48 Pg C en el año 2004, que corresponde al 22.6% de las emisiones del CO<sub>2</sub> antropogénicos en la escala mundial. Los proyectos de Uso de la Tierra, Cambio de

Uso de la Tierra y la Silvicultura (UTCUTS) deben implementarse para promover la captura del CO<sub>2</sub> atmosférico por ecosistemas y reducir la liberación del C almacenado. Los países no-industrializados (países no listados en el Anexo I del Protocolo) pueden generar proyectos para incrementar el almacén y captura del C en los ecosistemas en su territorio. El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) definido en el artículo 12 del Protocolo del Kyoto establece modalidades y procedimientos para certificación de los proyectos de captura de C en los países no-industrializados, incluyendo proyectos UTCUTS. El C almacenado adicionalmente, en comparación con el escenario sin implementación del proyecto, puede ser un recurso negociable en el mercado internacional de los Bonos del Carbono, después de su certificación por el MDL.

Sin embargo, el Protocolo del Kyoto resultó ser generalmente ineficiente en materia de la promoción de la captura del C en los bosques (Luyssaert *et al.*, 2008; Lorenz & Lal, 2010). El Protocolo del Kyoto en los artículos 3.3 y 3.4 toma en consideración solo los efectos de carácter antropogénico en los ecosistemas. Todos los cambios sobre el almacenamiento de C en los bosques son causados directamente por la actividad humana durante la deforestación, la reforestación o la aforestación, los cuales deben contabilizarse con respeto a la línea base del 1990. Las medidas para evitar la deforestación y preservar los bosques en su estado natural no fueron percibidas como actividad antropogénica en el diseño del Protocolo del Kyoto, y estas actividades quedaron excluidas de la contabilidad del C. Posiblemente, las

consecuencias de exclusión de los bosques naturales del Protocolo del Kyoto fueron subestimados por la aceptación de la hipótesis tradicional sobre la neutralidad de los bosques viejos en captura del C (Luyssaert *et al.*, 2008). En el primer periodo de aplicación del Protocolo del Kyoto (2008-2012), las políticas orientadas a la prevención de la deforestación o la degradación de los bosques en los países en desarrollo fueron intencionalmente excluidos (COP-7, Metz *et al.*, 2007). Esta insuficiencia del Protocolo del Kyoto puede acelerar el proceso de migración de las actividades relacionados con tala comercial de bosques a los países no industrializados (Lorenz & Lal, 2010). En consecuencia, para los países no-industrializados los proyectos de captura de C en el sector forestal, o proyectos del UTCUTS pueden incluir únicamente actividades de aforestación o reforestación. Solo este tipo de proyectos forestales cumplen con los criterios del Mecanismo de Desarrollo Limpio y pueden recibir el registro de la Junta Ejecutiva del MDL indispensable para darle un valor económico a la captura de C (Basu, 2009). Las limitaciones del marco normativo y la complejidad técnica en la implementación de los proyectos UTCUTS de captura de C causaron un desarrollo deficiente de esa captura en el sector forestal. Para mediados del año 2010 había ya 15 proyectos y 10 metodologías relacionadas con la aforestación o reforestación que fueron aprobados por el Mecanismo del Desarrollo Limpio en la escala global, con un total de 2300 proyectos en otros sectores (<http://cdm.unfccc.int/Statistics/>).

Los proyectos que siguen lineamientos de Mecanismo del Desarrollo Limpio de-

ben incluir un análisis detallado del balance de C en el escenario de la línea base y de la implementación del proyecto (ITTO, 2006). Adicionalmente, la captura de C en el proyecto es el requisito central para la certificación del MDL. De acuerdo con los criterios aplicables para los proyectos UTCUTS, el proyecto por evaluar debe presentar una capacidad de captura del CO<sub>2</sub> mayor que sin implementación de sus actividades. La captura del C adicional debe atribuirse exclusivamente a las actividades del proyecto y ser improbable en el escenario de la línea base. Las emisiones adicionales de los gases de efecto invernadero (fugas) causadas por el proyecto en todas las etapas de la implementación en todo su ámbito (incluyendo las originadas fuera del área de proyecto) deben ser contabilizadas y consideradas en el análisis de adicionalidad. Las fugas pueden producirse como resultado del desplazamiento de las actividades tradicionales en el territorio designado para el proyecto, a otra zona, o afectando el uso del suelo en la región a través de los mecanismos del mercado. La contabilidad detallada del balance de C en los ecosistemas implica el uso de metodologías complejas, particularmente para documentar la cantidad del C almacenado por la vegetación (Basu, 2009). El criterio de elegibilidad del terreno para el proyecto de reforestación o aforestación se basa en el análisis histórico del uso del suelo. Para cumplir con este criterio la zona de implementación del proyecto no debe contar con el bosque desde el 31 de diciembre de 1989, y mantener su estado sin bosque en la fecha del inicio del proyecto. La definición del bosque depende de los organismos nacionales, y para México el ecosistema es de carácter forestal en caso

que la cobertura de las copas de los árboles exceda el 30%, la altura mínima del dosel sea mayor que 4 m y la superficie del área sea mayor a 1 ha (<http://cdm.unfccc.int/DNA/view.html?CID=140>). Entre otros criterios del MDL se encuentran la eficiencia económica, la sostenibilidad, la ausencia del daño al medio ambiente, y adicionalmente pueden ser validados los beneficios para el medio ambiente, la biodiversidad y los socioeconómicos.

#### Proyecto de Captura de Carbono en San Andrés, Talpa de Allende, Jalisco

El análisis en las comunidades forestales del ejido de San Andrés, Sierra de Cuale, Talpa de Allende, Jalisco (Figura 8.2.1) se inició en el año 2005 para evaluar la posibilidad de la implementación de un proyecto forestal de captura de C, que pudiera obtener la certificación internacional a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio. El sitio para la implementación del proyecto es un terreno bajo el dominio ejidal, con presencia de bosque en la mayor parte de la superficie. El “Ejido San Andrés”, constituido por 76 ejidatarios,

posee una superficie superior de 9100 ha de relieve irregular; para el proyecto fueron designadas 8116 ha de su territorio (*área del proyecto*, “K”), excluyendo la parte del territorio utilizada por ejidatarios para vivienda y para las prácticas agrícolas y ganaderas. Las actividades productivas registradas en el ejido incluyen la actividad forestal (aprovechamiento maderable, producción del carbón vegetal comercial), la ganadería extensiva (bovina, caprina) y agricultura de temporal (principalmente maíz). El área del proyecto no es parte de territorios con un régimen de protección establecido. A menos que 1 km al norte del límite del “Ejido San Andrés” inicia la zona catalogada por CONABIO (2000) como Región Terrestre Prioritaria (RTP-62 Sierra Vallejo – Río Ameca).

El análisis inicial del área del proyecto permitió determinar qué la mayor parte de la superficie estudiada cuenta con bosques naturales con régimen de aprovechamiento forestal o sin manejo. Los bosques se consideran gestionados cuando están sujetos a intervenciones humanas periódicas o continuas, y a todo tipo de prácticas de manejo, desde la producción comercial de madera



Figura 8.2.1. Vista del cañón del Arroyo Pitillal en el “Ejido San Andrés”, en los límites de área del proyecto.

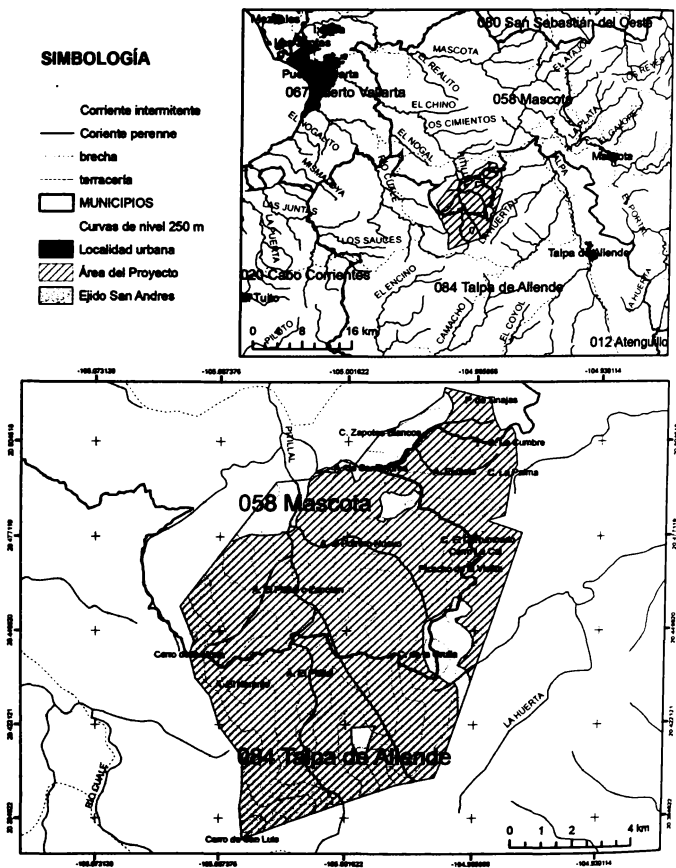


Figura 8.2.2. Ubicación del Área del proyecto, dentro del Ejido San Andrés, Talpa de Allende, Jalisco.



hasta la protección para fines no comerciales (IPCC, 2003). Según el Programa de Manejo Forestal del Ejido San Andrés (CONAFOR, 1998), vigente en los años 1999-2009, se determinó que una superficie forestal de 3594 ha en el área del proyecto pertenecía a los bosques gestionados. Sólo una fracción menor de la superficie ubicada a lo largo de los arroyos principales carece de bosque. El análisis de los datos de percepción remota para el año 2003 permitió determinar que el 86% del *área del proyecto* cuenta con bosque templado, 8% cuentan con bosque tropical y el restante 5-6% pertenece a las áreas perturbadas, pastizales y zonas sin vegetación aparente. De acuerdo con los criterios del Mecanismo del Desarrollo Limpio, el sitio del proyecto, en su mayor parte, no es elegible para los proyectos UTCUTS de reforestación/aforestación, porque en la fecha del inicio del proyecto existía vegetación con arbolado denso que cumplía con el criterio nacional de bosque; así mismo, existen registros históricos de presencia del bosque en año 1990 (línea base). Considerando la importancia de la captura de CO<sub>2</sub> en los ecosistemas naturales, y la posibilidad de modificación de la normatividad bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se realizó el análisis de captura del carbono en San Andrés, tomando en cuenta la dificultad para implementar el proyecto en la etapa actual. Por otra parte, la decisión de continuar el análisis se apoyó en el compromiso con los ejidatarios y con la Comisión Nacional Forestal de México, organismo que apoyó el proyecto. Actualmente México cuenta con un esquema nacional de pago por servicios ambientales (Cobrería y Brown, 2008), y los resultados del estudio

pueden ser útiles para este tipo de proyectos. El proyecto implicó el desarrollo de una metodología propia de contabilización del carbono en los ecosistemas, ya que en el año 2005 no existía metodología para el sector reforestación/aforestación aprobada por el MDL.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de análisis de captura del carbono fue desarrollada de conformidad con las recomendaciones del IPCC para los proyectos UTCUTS (IPCC, 2000, 2003; Ponce-Hernández, 2004). La metodología de análisis realizada en el sitio del proyecto y en su ámbito incluye los siguientes elementos esenciales: 1) evaluación de uso de suelo actual, distribución actual de los ecosistemas y tendencias de cambio de uso del suelo por medio de análisis de los imágenes de percepción remota; 2) análisis de biomasa actual y del depósito del carbono en biomasa de los ecosistemas presentes en el área del proyecto, particularmente en ecosistemas forestales; 3) análisis de la dinámica del almacén del carbono en ecosistemas relevantes, en condiciones de la línea base y en diferentes escenarios de implementación del proyecto, utilizando modelos de simulación de dinámica de carbono; 4) integración de estimación del depósito de carbono y de su dinámica en los ecosistemas con los datos sobre uso del suelo, aplicación de factores de expansión para los suelos, contabilización de balance del carbono en los escenarios de implementación del proyecto, cálculo de adicionalidad y evaluación del potencial de los escenarios para captura de carbono. De acuerdo con las opciones que ofrecen los

lineamientos de IPCC (IPCC, 2000, 2003), el almacén del carbono en los suelos no fue medido directamente en la etapa de evaluación inicial, debido a las dificultades metodológicas que implica este tipo de análisis.

Se realizó un análisis histórico del uso del suelo con base en imágenes de satélite multispectrales Landsat 1 (MSS), 5 (MSS) y 7 (ETM+) en las fechas de captura 03.02.1973, 20.04.1986, 14.05.1992, 30.05.1992 y 13.05.2003. La resolución espacial de los datos fuente utilizados permite realizar el análisis con una precisión de hasta hectáreas, y se relacionó con el pixel de 60×60 m para las imágenes históricas y el pixel de 28.5×28.5 m para la imagen del año 2003. Los fuentes de los datos auxiliares utilizados en el trabajo incluyeron el Modelo Digital de Elevación descargado en mayo del 2005 del sitio de Internet del INEGI conocido como Sistema de Descarga del Continuo de Elevaciones (<http://mapserver.inegi.gob.mx/>) y los mapas topográficos F13C69, F13C79, F13D71, F13D61 editadas por el INEGI con escala 1:50000. Las imágenes de satélite fueron preparadas y procesadas de acuerdo con los métodos estándares (Lillesand & Kiefer, 1994; ERDAS, 1999; Richards & Jia, 2006), incluyendo la etapa de la clasificación supervisada, que permitió elaborar los mapas de uso del suelo en el área del proyecto que corresponden las fechas de toma de las imágenes. Para los mapas de vegetación y de uso de suelo se utilizó una estructura común de categorías, que permitió la comparación entre las fechas y la detección de las tendencias históricas de cambio de uso del suelo. La precisión de la clasificación supervisada de la imagen del año 2003 se evaluó por

medio de la comparación con los puntos de referencia registrados durante el trabajo del campo realizado en el año 2005.

Los inventarios detallados de los ecosistemas principales del área del proyecto son un requisito para estimación precisa de la biomasa actual presente en los ecosistemas. Los inventarios fueron realizados en el año 2005 y consistieron en el establecimiento de los seis sitios de muestreo de 0.1 ha. La metodología de muestreo descrita por Gentry (1982) permite obtener los datos sobre la estructura de vegetación en el ecosistema. El diseño de muestreo se basó en 10 parcelas circulares de 100 m<sup>2</sup> cada una, distribuidas en un rectángulo de 60 m × 46 m con arreglo aleatorio estratificado, dando como resultado una superficie total de muestreo de 1000 m<sup>2</sup>. En cada una de las parcelas se registró la presencia y abundancia de especies de plantas vasculares en todos los estratos, así como su forma de crecimiento. Se midió el diámetro de los troncos de árboles en la altura del pecho (1.30 cm, DAP), considerando sólo las plantas con DAP ≥ 2.5 cm. Asimismo, se registró la presencia de árboles muertos en pie y de troncos caídos. En el análisis de los datos de muestreo se calcularon las áreas basales y los valores de importancia de las especies arbóreas. Para las especies con mayor valor de importancia en los sitios muestreados se realizaron series de mediciones de altura del árbol en relación con su DAP, lo que permitió parametrizar las ecuaciones alométricas que relacionan la altura y el diámetro para las especies más representativas.

El análisis de la biomasa en los ecosistemas forestales se basó en la aplicación de ecuaciones alométricas para la estima-

ción de la biomasa aérea de los árboles, y la aplicación del factor de expansión para la biomasa subterránea, un método comúnmente utilizado en el análisis de la biomasa (Brown, 1997; Martin *et al.*, 1998; Snowdon *et al.*, 2000; Parresol, 2001; Snowdon *et al.*, 2002; Chave *et al.*, 2003; Chave *et al.*, 2004; Baker *et al.*, 2004; Lorenz & Lal, 2010; etc.). En teoría, las ecuaciones alométricas pueden ser parametrizadas de forma precisa para cada especie arbórea y para cada rango de edades del desarrollo de la planta. En la práctica esto implica un muestreo destructivo de los árboles, para medir el peso de sus troncos y otras partes de la planta, talando varios individuos de cada especie para obtener datos estadísticos suficientes para la parametrización de la ecuación (Parresol, 2001). Este tipo de muestreo está fuera de alcance en los proyectos de captura de carbono por su importante contribución a las fugas del C del proyecto. La alternativa es utilizar las ecuaciones genéricas disponibles en literatura, con la parametrización obtenida por el uso de los métodos no destructivos. En el presente proyecto para el cálculo de la biomasa aérea (AGB) fueron elegidos las ecuaciones alométricas de forma  $AGB = f(DAP, A, \rho) + \xi$ ,

donde DAP es diámetro del tronco en altura del pecho

A – alto del árbol

$\rho$  – gravedad específica de madera seca

$\xi$  – valor residual de la desviación de alometría perfecta, que contribuye al error de estimación.

En la literatura no están reportadas las ecuaciones para las especies registradas en

los ecosistemas del área del proyecto. Siguiendo los criterios de Chave *et al.* (2004) se eligieron ecuaciones genéricas aplicables para las especies de árboles de afinidad templada o tropical, con selección de una ecuación propia del grupo taxonómico cuando los datos estuvieron disponibles. La importancia de considerar la densidad de madera en la estimación de la biomasa fue subrayada en varios estudios (Brown, 1997; Ketterings *et al.*, 2001; Baker *et al.*, 2004). Las ecuaciones de la literatura se modificaron para tomar en consideración el parámetro de gravedad específica de madera, cuando la ecuación original no incluía esta variable. La biomasa subterránea del ecosistema es muy variable porque está en función del tipo de ecosistema, encontrándose en un intervalo de 4% a 230% de la biomasa aérea, mientras que la biomasa de las raíces en bosques caducifolios se encuentra en un intervalo de 23% a 85% del AGB, y en los bosques húmedos de montaña de 11% a 33% del AGB (Brown, 1997). La medición directa de la biomasa subterránea y de la biomasa de las raíces es compleja y requiere el uso de prácticas destructivas. El IPCC (2000) recomienda el uso del factor de expansión común, para la vegetación de afinidad templada, que considera la relación entre biomasa de raíces y AGB de 0.25, factor aplicable para el análisis en San Andrés.

La comparación directa entre los inventarios detallados realizados en los momentos de tiempo separados es el método más preciso para determinar cambios de biomasa en un ecosistema (Lorenz & Lal, 2010). Sin embargo, la limitación que se tuvo en tiempo y recursos en la evaluación inicial

del potencial de captura de carbono no permiten analizar cambios de biomasa mediante la medición directa en una cronosecuencia. El método sugerido en los lineamientos de IPCC (2000, 2003) es el uso de modelos paramétricos para simular de manera detallada los flujos del carbono en un ecosistema forestal y tomar en consideración los efectos de disturbios en estos flujos. De acuerdo con la clasificación de Lorenz & Lal (2010) los modelos para simulación de dinámica de biomasa pueden estar basados en las curvas empíricas de crecimiento y producción (e.g.: modelos EFISCEN, Nabuurs *et al.*, 2000; CO<sub>2</sub>FIX, Masera *et al.*, 2003; CBM-CFS3, Kurz *et al.*, 2009) o en la simulación de fotosíntesis (e.g.: modelos BIOME-BGC, Running & Gower, 1991; CENTURY, Metherall *et al.*, 1993; 3-PG, Landsberg & Waring, 1997; TEM, Tian *et al.*, 1999).

Compartimos el punto de vista de Laroque *et al.* (2008), de que la mayoría de los modelos disponibles para el análisis del ciclo de carbono en los ecosistemas forestales cuentan con desperfectos conceptuales en la representación de la realidad, y los grados de incertidumbre en sus predicciones no fueron evaluados adecuadamente. Para el estudio en San Andrés se eligió aplicar el modelo basado en las curvas empíricas de crecimiento, para aprovechar completamente la información sobre estructura de ecosistemas obtenida durante el trabajo de campo. Entre las versiones de los modelos disponibles en el año 2005, cuando se realizó el análisis, no encontramos un modelo suficientemente flexible para la modelación de los flujos de carbono en los ecosistemas de bosques naturales.

Para el objetivo del presente proyecto fue elaborado un modelo propio de dinámica y flujos del carbono en ecosistemas forestales (Shalisko *ined.*, Figura 8.2.3). El modelo toma en cuenta los almacenes de carbono en biomasa y en MO en descomposición, pero no toma en cuenta el almacén de carbono en los suelos, de acuerdo con la opción que ofrece el IPCC (2000, 2003) para los proyectos de captura de carbono forestales. El modelo es aplicable para la simulación del crecimiento del bosque por años, desde el momento del censo inicial. Para el cálculo de cambios de biomasa se contempla el proceso de crecimiento de los árboles de cada especie, y la mortalidad de los árboles con las trazas individuales para cada especie en función de edad y la reproducción natural. De esta forma la composición de especies en la vegetación se mantiene relativamente constante durante la simulación. Las alteraciones antropogénicas del ecosistema se contemplan en forma de eventos de tala de árboles de determinada edad y especie y en forma de plantación de árboles jóvenes. Entre los parámetros de configuración del modelo aparecen los modelos probabilísticos por especie:  $f_{dbh}(t)$ : ecuación de incremento del DAP en función de tiempo a partir de inicio de crecimiento;  $f_{agh}(DBH)$ : ecuación de biomasa aérea de árbol en función del DAP (misma que fue utilizada para la estimación de la biomasa aérea actual),  $f_d(t)$ : ecuación de mortalidad del árbol en función del tiempo a partir del inicio de crecimiento,  $f_{AGB,D}$ : función sintética probabilística de biomasa y de mortalidad de individuo de árbol en función del tiempo a partir del inicio de crecimiento de individuo. En la etapa de configuración del modelo se realiza el análisis

sis de la estructura de edades de los árboles por especie en el ecosistema. Los datos sobre el número de individuos de árboles por especie por edades y por unidad de superficie son las fuentes iniciales para la simulación. La descomposición de la MO fue estimada de acuerdo con Hicke *et al.* (2004), considerando el tiempo promedio de descomposición de los desechos sólidos orgánicos estimado en 20 años.

La integración de los resultados de estimación de biomasa en ecosistemas con los datos de uso del suelo se realizó con base en las clases de vegetación, tomando el valor promedio para el tipo de vegetación determinado en base de los sitios de muestreo (Ponce-Hernández, 2004). Los tipos de vegetación con poca representación en el área del proyecto o no incluidas en el muestreo fueron incorporados tomando datos de literatura. De acuerdo con Gifford (2000) en los ecosistemas forestales el contenido del C en la biomasa aérea seca es de  $50\% \pm 2\%$ , para la estimación del almacén de carbono con base en la biomasa total del ecosistema se utilizó en factor de expansión 0.5, conforme a las recomendaciones del IPCC (2003). El cálculo del balance del C en el escenario de la línea base y en los distintos escenarios de implementación del proyecto, así como el cálculo de adicionalidad de captura de C en los escenarios se realizaron de acuerdo con las fórmulas y lineamientos sugeridos por el IPCC (2000, 2003).

## RESULTADOS

### Estimación de biomasa en los sitios de muestreo

El muestreo en los seis sitios del área del proyecto realizado en mayo y junio del 2005 permitió estimar su biomasa aérea actual, biomasa total y el C almacenado en la biomasa. La estimación de la biomasa de los árboles muertos en pie fue incluida en la biomasa aérea del sitio. Los resultados de la estimación confirmaron que en determinados ecosistemas una importante parte del almacén del carbono en los sitios se encuentra en los árboles viejos de gran talla (Chave *et al.*, 2003). Así, en el sitio de muestreo 2, los cuatro individuos grandes de diversas especies (*Sideroxylon* sp., *Carpinus tropicalis*, *Cornus disciflora* y *Quercus castanea*) concentran la biomasa aérea de más de 23 Mg, que es superior a la contribución de otros 64 individuos de árboles con DAP superior a 2.5 cm en el sitio. Los resultados de este análisis están resumidos en el cuadro 8.2.1.

Los resultados de la estimación en los sitios de muestreo son comparables con los datos relevantes reportados en la literatura: biomasa aérea para el bosque tropical caducifolio en Chamela, Jalisco, México ( $85 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Martínez-Yrizar *et al.*, 1992), bosque tropical húmedo en Barro Colorado, Panamá ( $281 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) (Chave *et al.*, 2003), bosque tropical mixto muy húmedo denso ( $239\text{-}366 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), bosque tropical mixto moderadamente húmedo denso ( $194\text{-}214 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), bosque tropical moderadamente húmedo de baja densidad ( $120\text{-}125 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) en Panamá (Brown, 1997), bosque de *Quer-*

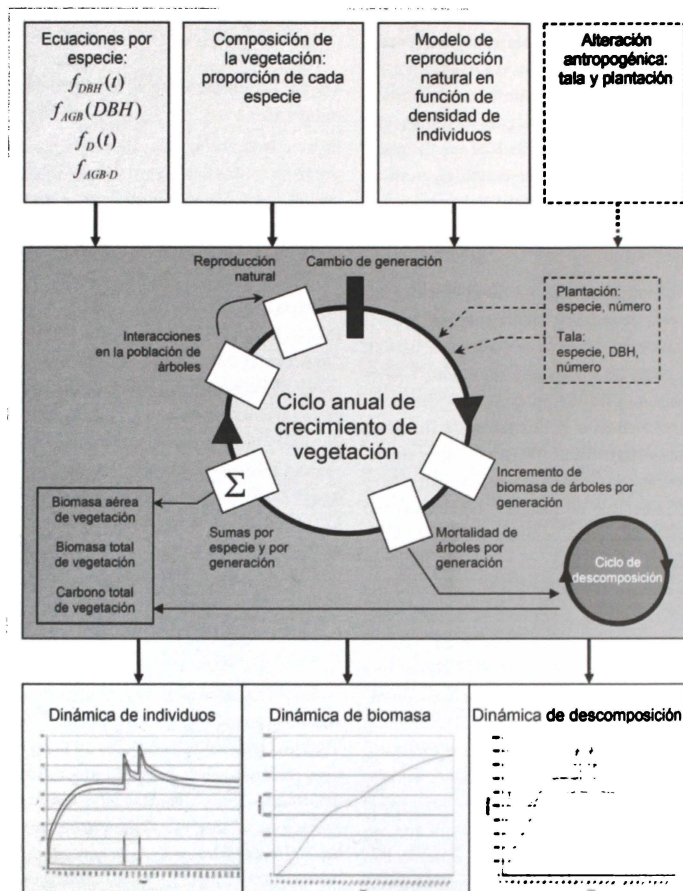


Figura 8.2.3. Estructura del modelo de flujos de carbono en la vegetación natural basado en las curvas empíricas de crecimiento, elaborado para proyecto de captura de carbono en San Andrés, Talpa de Allende, Jalisco.

• Cuadro 8.2.1. Valores de biomasa y de carbono almacenado en biomasa, estimados para los sitios de muestreo en San Andrés, Talpa de Allende, Jalisco.

Sitio de muestreo	Tipo de vegetación	Área basal total de los árboles en el sitio de 0.1 ha (dm <sup>2</sup> )	Biomasa aérea ± desviación estándar (Mg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa total (Mg ha <sup>-1</sup> )	Carbono almacenado en biomasa (Mg C ha <sup>-1</sup> )
1	Bosque mixto de <i>Quercus</i> y <i>Pinus</i> (perturbado)	166.06	76.97 ±16.01	96.21	48.11
2	Bosque mesófilo de montaña	296.30	407.46 ±183.89	509.33	254.66
3	Bosque mesófilo de montaña con <i>Abies</i>	438.61	302.54 ±62.22	378.18	189.09
4	Bosque de <i>Quercus</i>	210.16	136.22 ±45.93	170.27	85.14
5	Bosque de galería	239.49	250.57 ±106.10	313.22	156.61
6	Bosque mixto de <i>Quercus</i> y <i>Pinus</i>	203.12	115.53 ±34.22	144.41	72.20

cus templado en Coweta, EUA (139 Mg ha<sup>-1</sup>), promedio para bosque de *Quercus* templado en EUA (166 Mg ha<sup>-1</sup>) (Day & Monk, 1974), bosques tropicales secos de montaña (60 Mg ha<sup>-1</sup>), bosques de montaña tropicales húmedos (48-348 Mg ha<sup>-1</sup>) (IPCC, 2003). Los valores de C almacenado en los bosque mexicanos comparables son: bosque de *Pinus* con régimen de manejo (47 Mg C ha<sup>-1</sup>), bosque mixto de *Quercus* y *Pinus* con el régimen de conservación (33 Mg C ha<sup>-1</sup>), selva alta en conservación (140 Mg C ha<sup>-1</sup>), selva baja en conservación (49 Mg C ha<sup>-1</sup>), bosque manejado de *Pinus* en Michoacán (74 Mg C ha<sup>-1</sup>) (Ordoñez *et al.*, 2001), bosques en áreas naturales protegidas de México (40-130 Mg C ha<sup>-1</sup>), bosques naturales manejados en México (84-130 Mg C ha<sup>-1</sup>) (Masera *et al.*, 1995), bosque mixto de *Quercus* y *Pinus* (135 Mg C ha<sup>-1</sup>) (De Jong *et al.*, 1997; citado por Ordoñez *et al.*, 2001).

#### Ecosistemas naturales en el área del proyecto

El análisis de los tipos de vegetación natural presentes en el área del proyecto se basó en el sistema de clasificación de la vegetación de Rzedowski (1978). De acuerdo con este sistema de tipos de vegetación en el área del proyecto están presentes los siguientes ecosistemas primarios: bosque de pino (BP, incluye otras coníferas, particularmente del género *Abies*); bosque mixto de pino-encino (BPQ); bosque de encino (BQ); bosque mesófilo de montaña (BMM); bosque de galería (BGal); bosque tropical caducifolio (BTC).

El bosque de pino (y de otras coníferas) es un tipo de vegetación predominante en el área de proyecto, que contaba con más del 43% de la superficie en el año 2003. Bajo este nombre se entiende un tipo de vegetación con predominancia de árboles de coníferas del género *Pinus*. En el presente estudio en

la misma clase fueron incluidos fragmentos de bosque de oyamel (*Abies*). Los bosques de coníferas se observan en el área del proyecto en una altitud por encima de 1500-1600 msnm; estos bosques en México generalmente son exclusivos para altitudes mayores de 1800 msnm. Los bosques de *Abies*, a diferencia de los bosques de *Pinus*, están relacionados con intervalos de altitud de 1700 a 1800 msnm y se observan en el área del proyecto exclusivamente en los alrededores de arroyos, en las cañadas y los sitios planos. Las condiciones microclimáticas en los hábitats de bosque de *Abies* son evidentemente más húmedas, cercanas a las condiciones de los sitios con bosque mesófilo de montaña. Los bosques de *Pinus* cuentan con un estrato arbóreo que alcanza 20-25 m, y son considerados como bosques perennifolios cerrados con densidad de árboles intermedia. Los elementos florísticos constituyentes para los bosques de pino en el área del proyecto son *Pinus oocarpa*, *Pinus* aff. *jaliscana* y *Pinus pseudostrobus*; los árboles de *Quercus resinosa*, *Quercus scytophylla*, *Quercus praineana*, *Quercus gentryi* pueden estar presentes como elementos de importancia secundaria. El estrato inferior del bosque es escaso, formado por elementos como *Vaccinium* spp., *Chetrea rosei*, *Calliandra* spp., *Castilleja angustifolia*, *Brickellia* sp., *Hieracium* sp. A diferencia del bosque de pino, las cañadas con *Abies* presentan un estrato arbóreo dominado por *Abies guatemalensis* var. *jaliscana*, que alcanzan 30 m de alto. En segundo plano en el estrato arbóreo pueden estar presentes *Pinus pseudostrobus*, *Quercus scytophylla*. El sotobosque en las cañadas con *Abies* es rico en los elementos mesófilos, contiene entre otros *Guardiola tulocarpus*, *Phaseo-*

*lus* sp., *Oplismenus burmanii*, *Quercus* spp., *Astragalus* sp., *Hyptis* sp., *Eupatorium* spp., *Senecio angulifolius*, *Piqueria trinervia*, *Salvia mexicana*, *Salvia* spp., *Desmodium* sp., *Calliandra* sp., *Rhus toxicodendron*, *Myrica mexicana*.

La estimación de la biomasa del bosque de pino no se realizó en el presente estudio. En las estimaciones del C almacenado se utilizaron datos de la literatura disponible para bosques de *Pinus* mexicanos (Masera & Ordóñez, 1997); la biomasa total del BP es de 112 Mg ha<sup>-1</sup>, que equivale a 56 Mg C ha<sup>-1</sup> almacenado.

El bosque mixto de *Quercus* y *Pinus* es un tipo de vegetación que se encuentra en el segundo lugar por su abundancia en el área de estudio, llegando a ocupar más del 36% de la superficie en el año 2003. El bosque mixto en el área del proyecto ocurre a partir de 1200 msnm, predominando en un intervalo de altitud de 1400 a 1600 m y desaparece prácticamente por completo en elevaciones mayores de 1800 m. Fisiológicamente el bosque mixto aparece como una vegetación mosaico de elementos de bosque de coníferas y bosque de *Quercus*. El bosque de *Quercus* mixto con *Pinus* según Rzedowski (1978) es una comunidad natural formada en la zona de transición de dos distintas formaciones vegetales: bosque de *Quercus* y bosque de coníferas, que en un amplio rango de altitudes presentan las mismas características de respuesta a condiciones climáticas y similares características ecológicas. Por este motivo *Quercus* y *Pinus* forman un mosaico con relaciones complejas. Es un tipo de vegetación perennifolio o caducifolio formado por árboles de 15 a 25



m de altura, que varía desde bosque medianamente denso hasta cerrado. Los componentes predominantes en el estrato arbóreo son: *Quercus resinosa*, *Quercus planipocula*, *Quercus scytophylla*, *Quercus salicifolia*, *Quercus praineana*, *Quercus gentryi*, *Pinus oocarpa*, *Clethra rosei*. En el sotobosque son comunes *Agave maximiliana*, *Stevia* spp., *Salvia* spp., *Calliandra* sp., *Vernonia* sp., *Hieracium* sp., entre otras especies.

La estimación de la biomasa del bosque mixto se realizó con base en el análisis de los datos del campo para los sitios 1 y 6. El valor promedio de la biomasa total para los sitios 1 y 6 fue de 120.31 Mg ha<sup>-1</sup>, que corresponde a 60.16 Mg C ha<sup>-1</sup>. El error estándar de esta estimación es de 19.64% en promedio.

$$\begin{aligned} AGB_{\text{sitio}_1} &= 76.97 \text{ Mg/ha} \\ AGB_{\text{sitio}_6} &= 115.53 \text{ Mg/ha} \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} AGB_{\text{sitio}_1} &= 76.97 \text{ Mg/ha} \\ AGB_{\text{sitio}_6} &= 115.53 \text{ Mg/ha} \end{aligned}} \right\} \rightarrow AGB_{BQP} = 96.25 \text{ Mg/ha}$$

$$Biomasa\_Total_{BQP} = 1.25 \cdot AGB_{BQP}$$

$$= 120.31 \text{ Mg/ha}$$

$$C_{BQP} = Biomasa\_Total_{BQP} \cdot 0.5$$

$$= 60.16 \text{ MgC/ha}$$

El bosque de *Quercus* es una comunidad vegetal que en su forma pura está presente en más que 4% de la superficie del área del proyecto. Los bosques de *Quercus* en San Andrés son en su mayoría transicionales a bosques mixtos y en la clasificación de la imagen de satélite fueron incorporados a esta categoría, con pocas excepciones. En el bosque de *Quercus* en el Ejido San Andrés son características las laderas y lomas en un intervalo de altitud de 1200 a 1500 msnm. El bosque de *Quercus* está compuesto por un estrato de árboles del mismo género, que pueden ser caducifolios o perennifolios. Por

lo general se trata de bosques cerrados con competencia evidente de los árboles por la luz. Los encinos pueden alcanzar una altura de más de 20 m, pero por lo general son más bajos y en algunas ocasiones el dosel es sólo de 10 m. Los troncos de los árboles casi nunca son rectos; sus cortezas son ásperas, de apariencia muy característica. Los arbustos y plantas herbáceas se desarrollan en el sotobosque igual que en las comunidades mixtas de *Quercus* y coníferas. La composición florística de bosque de encino incluye *Quercus obtusata*, *Quercus mucronado*, *Quercus glaucoides*, *Quercus* aff. *laurina*, *Quercus castanea*, *Quercus scytophylla*, predominantes en el estrato arbóreo. Ocasionalmente ocurren *Pinus oocarpa* y *Pinus lumholtzii*. En el sotobosque son notables *Rumfordia floribunda*, *Pteridium feei*, *Senecio* sp., *Vigna pubescente*, *Phaseolus* sp., *Desmodium* spp., *Mimosa* sp., *Cheilanthes angustifolia*, y *Aeschynomene petraea*.

La estimación de biomasa del bosque mixto se realizó con base en el análisis de los datos de campo para el sitio 4. El valor de la biomasa total para el sitio 4 es de 170.27 Mg ha<sup>-1</sup>, que corresponden a 85.14 Mg C ha<sup>-1</sup>. El error estándar de esta estimación es de 33.72% del promedio.

$$AGB_{\text{sitio}_4} = AGB_{BQ} = 136.22 \text{ Mg/ha}$$

$$Biomasa\_Total_{BQ} = 1.25 \cdot AGB_{BQP}$$

$$= 170.27 \text{ Mg/ha}$$

$$C_{BQ} = Biomasa\_Total_{BQ} \cdot 0.5$$

$$= 85.14 \text{ MgC/ha}$$

El bosque mesófilo de montaña en el área del proyecto es un tipo de vegetación estrictamente relacionado con las cañadas

o barrancas húmedas en un intervalo de altitud de 1400 a 1800 m. Las condiciones microclimáticas características para este tipo de vegetación incluyen un nivel alto de humedad, mayor que en las laderas circundantes. Por lo general, el bosque mesófilo de montaña se observa en las mismas cañadas o arroyos que el bosque de *Abies*, pero en menor altitud. El carácter discontinuo de su distribución resulta en alta fragmentación y baja contribución en superficie (menos que 2% de la superficie). Es un tipo de vegetación sumamente importante, que cuenta con una riqueza muy grande de flora, y valores muy altos de biomasa por unidad de superficie. El bosque mesófilo de montaña combina elementos de afinidad templada y tropical. Algunos árboles presentes en las cañadas húmedas son de talla muy grande y superan los 80 cm del diámetro del tronco. La altura del dosel es de 20 a 30 m. Los elementos arbóreos son diversos: *Cornus disciflora*, *Carpinus tropicales*, *Sideroxylon* sp., *Symplocarpon purpusii*, *Quercus castanea*, *Tilia occidentalis* son los más notables. El estrato del sotobosque es muy desarrollado, con predominancia de *Clusia salvinii*, *Senecio angulifolius*, *Zinowiewia concinna*, *Parathesis villosa*, *Ramirezella* sp., *Hedyosmum mexicanum*, *Piper glabratum*, *Ilex brandegeana*, *Eugenia* sp., *Salvia* spp., y *Vernonia* sp. En el límite altitudinal superior de la distribución los elementos mesófilos pueden observarse junto con *Abies guatemalensis* var. *jalscana*. En el límite inferior de la distribución del bosque mesófilo de montaña, las especies de bosque de galería y elementos de afinidad tropical juegan un papel importante; en San Andrés particularmente se trata de las especies *Populus guzmanantlanensis*,

*Gyrocarpus* sp., *Croton* spp., *Annona* sp., *Styrax argenteus* y *Ardisia* sp.

El cálculo de la biomasa del bosque mesófilo de montaña se realizó en conjunto con el bosque de *Abies*, a pesar de que de acuerdo con el sistema de Rzedowski, pertenecen a distintas clases de vegetación. Los dos tipos de bosque presentan similitudes importantes en términos del carácter del ecosistema y volumen de biomasa. La estimación de la biomasa del bosque mesófilo de montaña junto al bosque de *Abies* se realizó con base en el análisis de los datos del campo para los sitios 2 y 3. El valor promedio de la biomasa total para los sitios 2 y 3 es de 443.75 Mg ha<sup>-1</sup>, que corresponden a 221.88 Mg C ha<sup>-1</sup>. El error estándar de esta estimación es de 26.83% en promedio.

$$\begin{aligned} AGB_{\text{sitio}_2} &= 407.46 \text{ Mg/ha} \\ AGB_{\text{sitio}_3} &= 302.54 \text{ Mg/ha} \\ \left. \begin{array}{l} AGB_{\text{sitio}_2} \\ AGB_{\text{sitio}_3} \end{array} \right\} &= 355.00 \text{ Mg/ha} \\ Biomasa\_Total_{BMM} &= 1.25 AGB_{BMM} \\ &= 443.75 \text{ Mg/ha} \\ C_{BQP} &= Biomasa\_Total_{BMM} \cdot 0.5 \\ &= 221.88 \text{ MgC/ha} \end{aligned}$$

El bosque de galería es un tipo de vegetación asociado a las corrientes de agua perennes o intermitentes. En el área del proyecto el bosque de galería se observa principalmente a lo largo de los arroyos Pitillal, San Andrés, Potrero Nuevo, El Naranjo y El Gato. La altitud característica del bosque de galería en el área del proyecto es de 1000 a 1350 m. La superficie del bosque de galería no puede ser muy grande debido a esta dependencia de los corrientes de agua y sólo sobrepasa el 2.5% del K. Los árboles que integran el bosque de galería forman

una angosta franja a lo largo de los arroyos, alcanzando una altura de hasta 20 m. Entre los especies presentes en el bosque de galería de San Andrés, se pueden mencionar: *Po-pulus guzmanantlanensis*, *Salix* spp., *Alnus acuminata* ssp. *arguta*, *Ficus* spp. y *Annona* sp. Numerosas especies de plantas subacuáticas, como los representantes de las familias Cyperaceae y Araceae están asociadas a este tipo de vegetación.

La estimación de la biomasa del bosque de galería se realizó con base en el análisis de los datos de campo para el sitio 5. El valor de la biomasa total para el sitio 5 es de 313.22 Mg ha<sup>-1</sup>, que corresponden a 156.61 Mg C ha<sup>-1</sup>. El error estándar de esta estimación fue de 42.34% del promedio.

$$AGB_{sitio_5} = AGB_{sitio_3} = 250.57 \text{ Mg/ha}$$

$$Biomasa\_Total_{BGal} = 1.25 \text{ } AGB_{BGal}$$

$$= 313.22 \text{ Mg/ha}$$

$$C_{BGal} = Biomasa\_Total_{BGal} \cdot 0.5$$

$$= 156.61 \text{ MgC/ha}$$

El bosque tropical caducifolio está presente en el área de proyecto sólo en la parte de altitud baja, de 1000 a 1300 m, llegando a ocupar más que 5% de su superficie. Las condiciones microclimáticas apropiados para el bosque tropical caducifolio en el área del proyecto son las más secas y cálidas del intervalo de condiciones observados en el Ejido San Andrés. En su mayor parte esta vegetación de afinidad tropical está perturbada, ya que se encuentra en las partes bajas de las laderas, que son atractivas para actividades ganaderas. En muchas ocasiones se trata de una fase secundaria, conocida como "matorral subtropical". Este tipo de matorral

se desarrolla también en los sitios deforestados de bosque de *Quercus*. El bosque tropical caducifolio tiene una altura de dosel de 5 a 10 m, es una vegetación densa, formada por árboles de troncos delgados, ramificados cerca de la base. La composición florística del bosque tropical caducifolio del área de estudio es compleja: algunos componentes más importantes son *Bursera* spp., *Lysiloma* spp., *Acacia* spp., *Guazuma ulmifolia* y *Heliocarpus* spp.

La estimación de la biomasa del bosque tropical caducifolio no se realizó en el presente estudio, en lugar de esto se utilizaron datos de la literatura para el bosque tropical caducifolio de la región de Chamela, Jalisco (Martínez-Yrizar *et al.*, 1992); la biomasa total del BTC fue de 106.25 Mg ha<sup>-1</sup>, que equivale a 53.13 Mg C ha<sup>-1</sup> almacenado.

Los ecosistemas perturbados por actividad antropogénica

Entre los ecosistemas perturbados en San Andrés se observaron extensiones de pastizales con uso ganadero y terrenos con cultivos de temporal. En el estudio de Cairns *et al.* (2000) se cita el volumen del carbono en biomasa de terrenos de cultivo y de pastizales en Guerrero, Tabasco y Veracruz: los pastizales inducidos cuentan con biomasa aérea de 26.6 Mg ha<sup>-1</sup> (equivalente a 16.6 Mg C ha<sup>-1</sup> en biomasa total), los terrenos de cultivo cuentan con biomasa aérea de 16.4 Mg ha<sup>-1</sup> (10.3 Mg C ha<sup>-1</sup>). Estos datos se consideraron para el análisis en San Andrés.

### Estimación del carbono almacenado en ecosistemas en el área de estudio

El mapa de la vegetación y de uso del suelo (Figura 8.2.4, cuadro 8.2.2), con base en la clasificación de la imagen de satélite del año 2003, permitió realizar la extrapolación de los resultados de análisis de los ecosistemas a la totalidad del área de proyecto. Excluyendo los suelos, la cantidad del C almacenado en los ecosistemas forestales del área de proyecto (8116 ha) en San Andrés supera los 501 Gg C (equivalente a 1837 Gg del CO<sub>2</sub> capturado por fotosíntesis), con mayor contribución del bosque de *Pinus* y del bosque mixto en este almacén.

El análisis histórico de uso del suelo con imágenes de satélite permitió detectar un incremento de áreas sin vegetación arbórea (ecosistemas inducidos o artificiales) en el Ejido y en el área del proyecto. La tendencia de incremento del área sin vegetación arbórea en el periodo 1973-2003 fue descrita con una regresión lineal:

$$AA_{\text{Área proyecto}} (\%) = -1.208 + 6.3 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Año}$$

[R=0.540]

donde AA – área con ecosistemas inducidos o artificiales, que no cuenta con vegetación arbórea. Se detectó una tendencia pro-

• Cuadro 8.2.2. Tipos de vegetación presentes en el área del proyecto, superficie en el año 2003, y cantidad total de carbono almacenado en biomasa.

Clase (abreviación)	Tipo de vegetación	Contribución al área de proyecto (%)	Área en el año 2003 (ha)	Carbono almacenado en biomasa (%)	Carbono almacenado en biomasa (Mg C)
BP	Bosque de <i>Pinus</i>	43.78%	3554	39.69%	198 996
BPQ	Bosque mixto de <i>Quercus</i> y <i>Pinus</i>	36.08%	2928	35.14%	176 161
BQ	Bosque de <i>Quercus</i>	4.14%	336	5.70%	28 582
BTC	Bosque tropical caducifolio	5.33%	433	4.58%	22 979
BGal	Bosque de galería	2.58%	210	6.54%	32 810
BMM	Bosque mesófilo de montaña	1.95%	158	6.99%	35 057
Gan, Agr1, Agr2	Ecosistemas inducidos o artificiales (áreas agrícolas, pecuarios, asentamientos humanos)	5.02%	408	1.35%	6 778
No data	No clasificado	1.12%	91	-	-
Total		100%	8116	100%	501 362

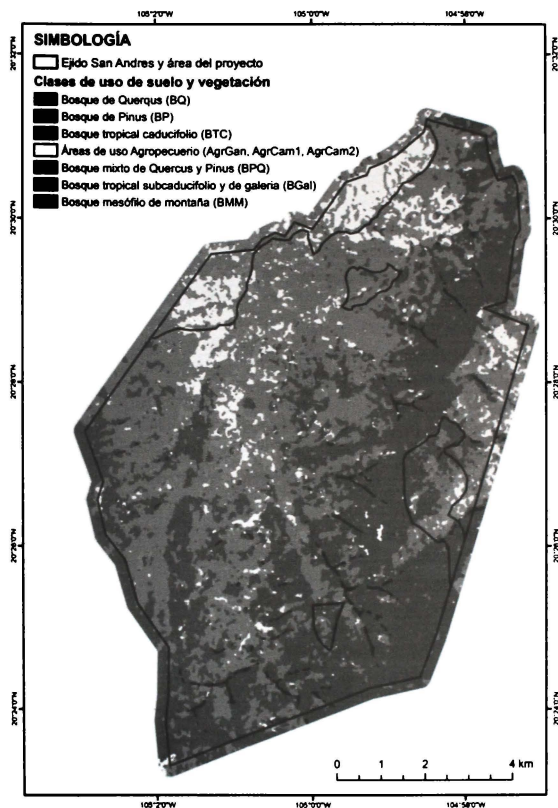


Figura 8.2.4. Uso del suelo y vegetación en el Ejido San Andrés, Talpa de Allende, Jalisco, en el año 2003.

medio de incremento de superficies de los ecosistemas sin estrato arbóreo de 5.04 ha por año en el área del proyecto (8.85 ha por año en el "Ejido San Andrés"). El incremento de las superficies deforestadas detectado está relacionado principalmente con la expansión de superficies para usos agropecuarios, y en menor grado, con la explotación de los bosques para extracción de carbón vegetal. La deforestación de vegetación primaria en el área del proyecto corresponde a la liberación de determinado volumen de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera por cambio de uso del suelo. De manera simplificada, en San Andrés los espacios deforestados se transforman a pastizales inducidos que cuentan con almacén de C en el orden de  $16.6 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (Cairns *et al.*, 2000). Durante la transformación del bosque a pastizal, la liberación gradual del C en el transcurso de los años depende del tipo de ecosistema primario involucrado, y

la liberación de C almacenado en biomasa varía de  $37 \text{ Mg C ha}^{-1}$  a  $205 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . La pérdida estimada anual del C durante la deforestación en el área del proyecto alcanza  $243 \text{ Mg C}$  y esta resumida en el cuadro 8.2.3.

### Efectos de la práctica de extracción de carbón vegetal

De todo espectro de actividades productivas en el Ejido San Andrés, la extracción de carbón vegetal (Figura 8.2.5) es la práctica que más importancia tiene para el tema de la captura de  $\text{CO}_2$ , ya que trata del uso de la biomasa como combustible y de la liberación de C almacenado a la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$ . El ejido San Andrés cuenta con un Programa de Manejo Forestal vigente en los años 1999-2009 (CONAFOR, 1998), que establece volúmenes permitidos de tala de árboles en el Ejido. El programa de Ma-

• Cuadro 8.2.3. Pérdida de carbono almacenado en la vegetación natural observada en el área del proyecto con respecto a la tendencia histórica de cambio de uso del suelo detectada en el periodo 1973-2003.

Tipo de vegetación	Superficie en el año 2003 (ha)	Pérdida promedio anual (ha)	Pérdida de carbono de biomasa por unidad de superficie ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ )	Pérdida anual de carbono almacenado en biomasa ( $\text{Mg C}$ )
Bosque de <i>Pinus</i>	3554	2.35	39.37	92.56
Bosque mixto de <i>Quercus</i> y <i>Pinus</i>	2928	1.94	43.53	84.34
Bosque de <i>Quercus</i>	336	0.22	68.51	15.22
Bosque tropical caducifolio	433	0.29	36.50	10.44
Bosque de galería	210	0.14	139.98	19.40
Bosque mesófilo de montaña	158	0.10	205.25	21.46
Todos tipos de bosque	7617	5.04	48.30	243.42



Figura 8.2.5. Extracción del carbón vegetal en el área del proyecto.

nejo Forestal establece parcelas del bosque de *Quercus* (BQ) y bosque mixto (BQP) sujetas a la práctica de extracción de carbón vegetal y madera.

De acuerdo con la Programa de Manejo Forestal, una superficie de 3594 ha en el área del proyecto queda potencialmente afectada durante 10 años, con la superficie sujeta a un aprovechamiento de 225.19 ha a 552.43 ha por año. En particular, la extracción permitida anual es en promedio  $48.60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (error estándar  $2.81 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) de madera de *Quercus*, *Pinus* y especies de árboles de hoja ancha. Esto equivale a la pérdida de  $32.29 \text{ Mg ha}^{-1}$  en biomasa aérea y  $20.18 \text{ Mg ha}^{-1}$  de C almacenado en el bosque de *Quercus*, y la pérdida de  $27.52 \text{ Mg ha}^{-1}$  en biomasa aérea y  $17.20 \text{ Mg ha}^{-1}$  de C almacenado en el bosque mixto. Durante todo el periodo de vigencia de Programa de Manejo Forestal la pérdida anual de C almacenado en biomasa será definida por la contribución de BQ y BQP en los lotes. Analizando superficies que en el año 2003 estuvieron ocupadas por BQ

y BQP se determinó que bajo aprovechamiento se encuentra un total de 2928.2 ha de BQP y 335.7 ha de BQ. La suma de estas superficies es inferior a la definida en Programa de Manejo Forestal, que puede significar que virtualmente todo el bosque con presencia de *Quercus* en el área del proyecto está sujeto a actividades relacionadas con la extracción de carbón vegetal. Considerando la proporción entre tipos de vegetación detectada en el análisis de uso del suelo se determinó el valor promedio anual de pérdida de C almacenado por el aprovechamiento de los bosques en el área del proyecto, que es de  $6292 \text{ MgC/año}$ .

$$P_{BQP} = 89.71\% \quad P_{BQ} = 10.29\%$$

$$P_{\text{carbon}} = 10.29 \cdot 7252.89 \text{ MgC} (\pm 611.66 \text{ MgC}) + 89.71\% \cdot 681.85 \text{ MgC} (\pm 521.33 \text{ MgC})$$

$$P_{\text{Carbon}} = 6292.01 \text{ MgC} (\pm 530.62 \text{ MgC})$$

El valor calculado fue comparado con el volumen de extracción de madera permitido: la extracción de  $48.60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  en 359.41

ha por año resulta en un volumen promedio de extracción de 17467.33 m<sup>3</sup>/año, que equivale aproximadamente a 8733.66 Mg C/año. El valor estimado en el presente estudio, analizando la biomasa forestal, es inferior a la estimación promedio del volumen de extracción de madera, que puede estar relacionado con el uso de valores de densidad de madera precisos para cada especie, analizados al momento de estimar la biomasa. El aprovechamiento forestal en el área del proyecto es causa de un flujo importante de C de origen antropogénico.

#### Escenarios de captura del carbono en San Andrés

El aprovechamiento forestal forma parte del “escenario línea base” del proyecto. La erradicación del aprovechamiento forestal puede resultar en un gradual incremento de la cantidad de C almacenado en los ecosistemas sujetos a aprovechamiento. El escenario sin tala de árboles se describió en la documentación del proyecto como un “escenario sin aprovechamiento forestal”. La estimación prospectiva del cambio de almacén del C en los ecosistemas fue realizado con el modelo propio de dinámica y flujos del C en bosque. La configuración del modelo para la estimación del almacén de C se realizó con base en los datos de estructura de los ecosistemas forestales de los sitios de muestreo 1, 4 y 6. El aprovechamiento forestal fue incorporado al modelo como una secuencia de eventos de tala de árboles en volúmenes establecidos por el programa de aprovechamiento 1999-2009, con un periodo de repetición de 10 años. La simulación del almacén de C en la biomasa de los ecosistemas abarca un perio-

do de 125 años desde el momento actual ( $t_0$ , precisamente el momento cuando se realizó trabajo de campo en los sitios de muestreo). Los resultados de simulación están ilustrados por las curvas en la Figura 8.2.6 y se resumen en el cuadro 8.2.4.

La diferencia del C almacenado en la biomasa entre el “escenario sin aprovechamiento forestal” y el “escenario línea base” fue extrapolada al área del proyecto, considerando que la superficie forestal sujeta a aprovechamiento fue de 2928.2 ha de BQP y 335.7 ha de BQ. Durante los primeros 25 años la acumulación adicional del C en biomasa fue estimada en 29 452 Mg C (Cuadro 8.2.5), que equivale a la captura de 107 794 toneladas de CO<sub>2</sub>. En promedio, en el transcurso de los primeros 25 años el incremento del almacén de C adicional fue de 1 178 Mg C/año equivalente a la captura de 4 312 toneladas de CO<sub>2</sub> por año. Los términos de referencia de la CONAFOR para los proyectos de captura de C establecen el margen inferior de adicionalidad para el proyecto: “los proyectos deben demostrar un potencial de captura adicional de entre 4000 y 8000 toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente, o hasta 40000 toneladas de captura distribuida en un periodo de cinco años” (CONAFOR, 2005). El abandono total de las prácticas del aprovechamiento forestal en el “Ejido San Andrés” permite obtener una captura adicional de C que cumple con este requisito. Entre las principales fuentes de fugas en el área del proyecto aparecen efectos de posibles incendios forestales y la posibilidad de un aprovechamiento maderable ilegal en el territorio de Ejido. Como ejemplo, se estimó que en el área del proyecto la extracción del volumen de madera de



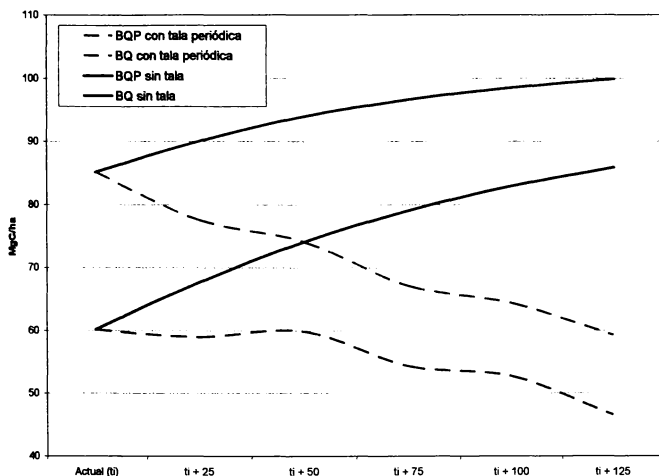


Figura 8.2.6. Dinámica del carbono almacenado en la biomasa total de la vegetación afectada por la práctica actual de extracción de C vegetal en 125 años: el "escenario línea base" (con tala periódica y extracción de carbono vegetal, representado por líneas punteadas); el "escenario sin aprovechamiento forestal" (sin tala, ni extracción de carbono vegetal, representado por líneas continuas).

*Pinus* mayor que 248 m<sup>3</sup>/año reduce la captura del C al valor debajo de límite inferior aceptable para proyectos de captura de C de la CONAFOR.

Los únicos tipos de proyectos del sector forestal conformes con los requisitos del Mecanismo de Desarrollo Limpio son los de aforestación y reforestación (Metz *et al.*, 2007). A pesar de que en el año 2003 la superficie sin bosque fue estimada en 5.04% del área del proyecto, los espacios para establecer plantaciones de árboles son escasos. Los espacios sin vegetación arbórea se concentran en la parte norte y norte-oeste del área del proyecto, cerca del poblado San Andrés y a lo largo de la corriente inferior de los arroyos El Pitillal, San Andrés, El Gato

y El Potrero Nuevo. Los sitios con los ecosistemas alterados o artificiales se refieren a los espacios que los ejidatarios siguen utilizando para prácticas agrícolas y ganaderas, así como los terrenos baldíos y los espacios ocupados por asentamientos humanos. Estos terrenos en su mayoría son esenciales para sobrevivencia de la comunidad del Ejido San Andrés. El espacio sin arbolado ubicado a lo largo de los arroyos y las corrientes de agua fue considerado como uno de los pocos espacios en el Ejido posibles para reforestación. *Populus guzmanantlensis* es un elemento nativo de la comunidad del bosque de galería presente en el área del proyecto, que se caracteriza por un rápido crecimiento. La especie está listada en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SE-

• Cuadro 8.2.4. Resultados de simulación del “escenario línea base” y “escenario sin aprovechamiento forestal” para los tipos de vegetación afectados por el programa de aprovechamiento 1999-2009, modelación para el periodo de 125 años.

		Actual ( $t_0$ )	$t_0 + 25$	$t_0 + 50$	$t_0 + 75$	$t_0 + 100$	$t_0 + 125$
Escenario línea base (con tala periódica)							
BQP	Biomasa aérea (Mg $ha^{-1}$ )	96.25	94.43	95.78	86.90	84.46	74.50
	Carbono en biomasa total (Mg C $ha^{-1}$ )	60.16	59.02	59.87	54.32	52.79	46.57
	Biomasa aérea (Mg $ha^{-1}$ )	136.22	124.18	118.52	107.37	103.00	94.85
	Carbono en biomasa total (Mg C $ha^{-1}$ )	85.14	77.61	74.07	67.11	64.37	59.28
Escenario sin aprovechamiento forestal							
BQP	Biomasa aérea (Mg $ha^{-1}$ )	96.25	108.26	118.52	126.54	132.73	137.40
	Carbono en biomasa total (Mg C $ha^{-1}$ )	60.16	67.66	74.08	79.09	82.96	85.88
	Biomasa aérea (Mg $ha^{-1}$ )	136.22	143.97	150.36	154.64	157.61	159.74
	Carbono en biomasa total (Mg C $ha^{-1}$ )	85.14	89.98	93.97	96.65	98.50	99.84
Incremento en carbono almacenado en la biomasa con la implementación del “escenario sin aprovechamiento forestal” en comparación con el “escenario línea base”							
BQP	Biomasa aérea (Mg $ha^{-1}$ )	0.00	13.83	22.74	39.64	48.28	62.90
	Carbono en biomasa total (MgC $ha^{-1}$ )	0.00	8.64	14.21	24.77	30.17	39.31
	Biomasa aérea (Mg $ha^{-1}$ )	0.00	19.79	31.84	47.27	54.61	64.89
	Carbono en biomasa total (MgC $ha^{-1}$ )	0.00	12.37	19.90	29.54	34.13	40.56

• Cuadro 8.2.5. Captura de carbono adicional en el “escenario sin aprovechamiento forestal” en toda la superficie sujeta a aprovechamiento en la Programa de Manejo Forestal 1999-2009 en el “Ejido San Andrés”; resultados de simulación para un periodo de 125 años.

		Actual ( $t_0$ )	$t_0 + 25$	$t_0 + 50$	$t_0 + 75$	$t_0 + 100$	$t_0 + 125$
BQ y BQP (3263.9 ha)	Biomasa aérea (Mg)	0	47141	77276	131928	159691	205967
	Carbono en biomasa total (Mg C)	0	29452	48290	82448	99801	128724

MARNAT-2001 como endémica protegida (Pr). El hábitat de *P. guzmanantlanensis* es asociado con espacios cerca de cauces de los arroyos y corrientes de agua; en el área del proyecto fueron detectadas 10-20 ha de superficie sin arbolado, que podrían utilizarse para la plantación de *P. guzmanantlanensis*. El escenario con “plantación de *Populus guzmanantlanensis*” se analizó como una alternativa al “escenario sin aprovechamiento forestal”.

La simulación del crecimiento de población de *P. guzmanantlanensis* se realizó para el periodo de 150 años, utilizando el mismo modelo de flujos de C en poblaciones. Para configurar el modelo se utilizaron las ecuaciones alométricas conocidas para *P. tremuloides*. En el caso de la plantación de árboles de *Populus*, se buscó la estrategia que puede resultar en un mayor incremento de biomasa en el transcurso del periodo de simulación. Una de las mejores estrategias encontradas (Figura 8.2.7) consiste en la plantación de 500 árboles jóvenes (de un año) por hectárea en el inicio del escenario, con una segunda temporada de plantación (200 individuos adicionales por hectárea) dentro de 10 años después del inicio, permitiría obtener un incremento del C almacenado hasta por más de 100 Mg C ha<sup>-1</sup> durante los primeros 70 años. La tercera y cuarta temporadas de

plantación de *Populus* en los años 70 y 80 después del inicio de escenario (200 individuos adicionales por hectárea en cada caso), permiten incrementar el almacén de C hasta el nivel de saturación en aproximadamente 175 Mg C ha<sup>-1</sup> (140-150 años). La captura del C adicional que puede ser obtenida estableciendo la plantación de 14 000 individuos de *P. guzmanantlanensis* en 20 ha en el área del proyecto, estimada para 125 años (Cuadro 8.2.6), fue de 32.7 Mg C/año (120.1 toneladas del CO<sub>2</sub> por año) en promedio, durante los primeros 25 años después de inicio del escenario. Este valor está muy por debajo de los límites de aceptación para proyectos de captura de C de la CONAFOR, y difícilmente puede ser satisfactorio desde el punto de vista económico (el precio por tonelada de CO<sub>2</sub> capturada en el sector forestal en el mercado internacional y nacional se encuentra en el rango de US\$4 – US\$12 (Cobrerá & Brown, 2008).

## CONCLUSIONES

El proyecto de captura de carbono (C) en las comunidades forestales de San Andrés no es elegible para certificación de acuerdo con los criterios del Mecanismo del Desarrollo Limpio para los proyectos UTCUTS, excepto la parte de superficie que no cuenta con

• Cuadro 8.2.6. Captura de carbono adicional por unidad de superficie en la plantación de árboles de *Populus guzmanantlanensis*.

		Actual (t <sub>i</sub> )	t <sub>i</sub> + 25	t <sub>i</sub> + 50	t <sub>i</sub> + 75	t <sub>i</sub> + 100	t <sub>i</sub> + 125
Plantación de <i>Populus</i>	Biomasa aérea (Mg ha <sup>-1</sup> )	0.00	65.48	126.57	172.88	235.07	269.78
	Carbono en biomasa total (Mg C ha <sup>-1</sup> )	0.00	40.92	79.11	108.05	146.92	168.61

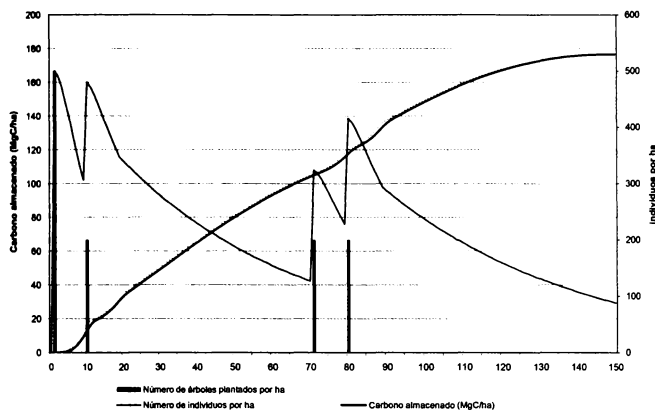


Figura 8.2.7. Cambios de biomasa aérea y número de individuos de árboles en la plantación de *Populus guzmanantlanensis* durante 150 años de simulación.

bosque. El análisis de adicionalidad en la plantación del árbol nativo de rápido crecimiento *Populus guzmanantlanensis* en 20 ha en el área del proyecto, detectó deficiencia en este escenario para propósitos de captura de C. La obtención de resultados mucho más significativos podrían haber promovido el abandono del aprovechamiento forestal autorizado en el Ejido San Andrés en los años 1999-2009. La ganancia en captura de C en caso de abandono total de las prácticas de aprovechamiento puede ser tan grande como 4 312 toneladas del  $\text{CO}_2$  por año. En el escenario con continuación de aprovechamiento en bosque de *Quercus* y bosque mixto la dinámica del C es negativa y es probable un decremento gradual de biomasa (figura 8.2.6). La importancia de los ecosistemas naturales en la captura del  $\text{CO}_2$  y en el almacenamiento de C puede ser ilustrada

con los valores del almacén actual de C en biomasa en San Andrés (Cuadro 8.2.2). Una tendencia de deforestación de  $5 \text{ ha año}^{-1}$  detectada en el área del proyecto resulta en la liberación a la atmósfera de 890 toneladas de  $\text{CO}_2$  por año en promedio.

El marco normativo internacional en el tema de la protección del C almacenado en la vegetación natural es uno de los requisitos esenciales para la futura versión del Protocolo del Kyoto o su sucesor (Luyssaert *et al.*, 2008; Cobrera & Brown, 2008; Lorenz & Lal, 2010). Las instituciones nacionales en México ofrecen unos programas de pago por servicios ecosistémicos, que incluyen pago por C capturado en los bosques, entre otros servicios. Estos programas en marco nacional representan un intento de reducir la tasa de deforestación. El proceso de deforestación, por una parte, está relacionado con insufi-

ciencias que existen en México en la regulación de las actividades de aprovechamiento forestal (incluyendo control de aprovechamiento ilegal), en el manejo sustentable de los recursos forestales, en la regulación de la urbanización y en el uso de áreas con vegetación primaria por la población rural (Cobrerá & Brown, 2008). Más del 80% de los bosques mexicanos pertenecen a las comunidades rurales locales (ejidos) (Klooster & Masera, 2000). La sensibilización de la población rural en el tema de la mitigación del cambio climático global y la protección del C almacenado en vegetación primaria parece ser una componente muy importante para lograr el éxito con de políticas de captura de C en México. Una estrategia posible para la protección del C en la vegetación en el Ejido San Andrés puede consistir en la búsqueda del pago por servicios ecosistémicos de los bosques en el ámbito nacional. Un requisito importante para la captura de C en San Andrés es el abandono de las prácticas de aprovechamiento forestal, autorizados por el gobierno, con una sustitución de ganancias que reciban los campesinos por ganancias provenientes de otras actividades.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la CONAFOR, por el apoyo para el estudio de potencialidad de la captura de carbono en San Andrés. Un agradecimiento especial para los campesinos del Ejido San Andrés por el permiso de realizar trabajo de campo en sus terrenos y por el apoyo otorgado.

#### LITERATURA CITADA

- Baker, T. R., O. L. Phillips, Y. Malhi, S. Almeida, L. Arroyo, A. Di Fiore, T. Erwin, T. J. Killeen, S. G. Laurance, W. F. Laurance, S. L. Lewis, J. Lloyd, A. Monteagudo, D. A. Neil, S. Patiño, N. C. A. Pitman, J. N. M. Silva, R. Vázquez-Martínez. 2004. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology* 10: 545-562.
- Basu, P. 2009. A green investment. *Nature* 457: 144-146.
- Begon M., Townsend C. R. y Harper J. L. 2006. *Ecology*. 4th ed. Blackwell Publishing Ltd. 737 p.
- Berg, B. y R. Laskowski. 2006. Litter decomposition. *Advances in Ecological Research* 38: 1-428.
- Brohan, P., J. J. Kennedy, I. Haris, S. F. B. Tett y P. D. Jones. 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850. *J. Geophysical Research* 111: D12106, doi: 10.1029/2005JD006548
- Brown, S. 1997. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer. Food and Agriculture Organization of the United Nations Forestry Paper No. 134.
- Cairns, M. A., P. K. Haggerty, R. Alvarez, B. H. J. De Jong y I. Olmsted. 2000. Tropical Mexico's Recent Land-Use Change: A Region's Contribution to the Global Carbon Cycle. *Ecological Applications* 10: 1426-1441.
- Chave J., Condit R., Aguilar S., Hernández A., Lao S. y Pérez R. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Phil. Trans. R. Soc. Lon.* B 359: 409-420.
- Chave, J., R. Condit, S. Lao, J. P. Caspersen, R. B. Foster y S. P. Hubbell. 2003. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forests: results from a large census plot in Panama. *Journal of Ecology* 91: 240-252.
- Cobrerá, E. y K. Brown. 2008. Building institutions to trade ecosystem services: marketing forest carbon in Mexico. *World Development* 36: 1956-1979. doi:10.1016/j.worlddev.2007.09.010
- CONABIO. 2000. Regiones Terrestres Prioritarias de México. México D. F. 610 pp.
- CONAFOR. 1998. Programa de Manejo Forestal del Ejido San Andrés vigente en el periodo 1999-2009.
- . 2005. Términos de referencia para el proyecto de captura de carbono.

- COP-7. 2001. FCCC/CP/2001/13/Add.2; 17/CP.7. Referred to as the Marrakesh Accords. Modalities and procedures for a clean development mechanism, as defined in Article 12 of the Kyoto Protocol.
- Day, F. P. y C. D. Monk. 1974. Vegetation patterns on a Southern Appalachian watershed. *Ecology* 55: 1064-1074.
- ERDAS 1999. ERDAS Field Guide. ERDAS, Inc. Atlanta, Georgia. 698 pp.
- FAO. 2006. Global Forest Resources Assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. Food and Agriculture Organization of the United Nations Forestry Paper No. 147.
- Gentry, A. H. 1982. Patterns of Neotropical plant diversity. *Evolutionary Biology* 15: 1-84.
- Gifford, R. M. 2000. Carbon Contents of Above-Ground Tissues of Forest and Woodland Trees NCAS (National Carbon Accounting System) Technical Report No. 22. Australia Greenhouse Office. 17 pp.
- Hansen, J., M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R. Berner, V. Masson-Delmotte, M. Pagani, M. Raymo, D. L. Royer y J. C. Zachos. 2008. Target Atmospheric CO<sub>2</sub>: where should humanity aim? *The Open Atmospheric Science Journal* 2: 217-231.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis y V. Oinas. 2000. Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario. *PNAS* 98: 9875-9880.
- Hicke, J. A., R. L. Sherriff, T. T. Veblen y G. P. Asner. 2004. Carbon accumulation in Colorado ponderosa pine stands. *Can. J. For. Res.* 34: 1283-1295.
- Houghton, R. A. 2007. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth Planet Science* 35: 313-347.
- IPCC. 2000. R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N. H. Ravindranath, D. J. Verardo y D. J. Dokken (eds.) IPCC special report on Land Use, Land-Use Change and Forestry. Cambridge University Press. 377 pp.
- Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe y F. Wagner (eds.) 2003 Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan. 632 pp.
- Metz, B., O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos y L. Meyer (eds.) 2005. La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono; resumen técnico. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 57 pp.
- Metz, B., O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave y L. A. Meyer (eds.) 2007 Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 "Mitigation of Climate Change". Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Pachauri R. K., A. Reisinger (eds.) 2008. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II, and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, Geneva, Switzerland. 103 pp.
- ITTO. 2006. Guidebook for the formulation of Afforestation and Reforestation Projects under the Clean Development Mechanism. ITTO Technical Series 25. International Tropical Timber Organization. 53 pp.
- Ketterings, Q. M., R. Coe, M. van Noordwijk, Y. Ambagau y Ch. A. Palm. 2001. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations in predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management* 146: 199-209.
- Klooster, D. y O. Masera. 2000. Community forest management in Mexico: Carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development. *Global Environmental Change—Human and Policy Dimensions* 10: 259-272.
- Kurz, W. A., C. C. Dymond, T. M. White, G. Stinson, C. H. Shaw, G. J. Rampley, C. Smyth, B. N. Simpson, E. T. Neilson, J. A. Trofymow, J. Metsaranta y M. J. Apps. 2009. CBM-CFSS: a model of carbon dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecol. Model.* 220: 480-504.
- Landsberg, J. J. y R. H. Waring. 1997. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For. Ecol. Manag.* 95: 209-228.
- Larocque, G. R., J. S. Bhatti, R. Boutin y O. Chertov. 2008. Uncertainty analysis in carbon cycle models of forest ecosystems: research needs and development of a theoretical framework to estimate error propagation. *Ecol. Model.* 219: 400-412.
- Lillesand, T. y R. Kiefer. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc.

- Lorenz, K. y R. Lal. 2010. Carbon sequestration in forest ecosystems. Springer, Dordrecht. 277 pp.
- Luyssaert S., E.-D. Schulze, A. Borner, A. Knohl, D. Hessenmöller, B. E. Law, P. Ciais, J. Grace. 2008. Old-growth forests as global carbon sink. *Nature* 455: 213-215.
- Luyssaert S., I. Inglima, M. Jung, et al. 2007. The CO<sub>2</sub>-balance of boreal, temperate and tropical forests derived from a global database. *Glob Change Biol.* 13: 2509-2537.
- Martin, J. G., B. D. Kloeppel, T. L. Schaefer, D. L. Kimbler y S. G. McNulty 1998. Aboveground biomass and nitrogen allocation of ten deciduous Appalachian tree species. *Can. J. For. Res.* 28: 1648-1659.
- Martinez-Yrizar, A., J. Sarukhan, A. Perez-Jimenez, E. Rincon, J. M. Maass, A. Solis-Magallanes y L. Cervantes. 1992. Above-ground phytomass of a tropical deciduous forest on the coast of Jalisco, México. *Journal of Tropical Ecology* 8: 87-96.
- Masera, O. R., J. F. Garza-Caligaris, M. Kanninen, T. Karjalainen, J. Liski, G. J. Nabuurs, A. Pussinen, B. H. J. de Jong y G. M. J. Mohrenf. 2003. Modelling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX.V2 approach. *Ecol. Model.* 164: 177-199.
- Masera, O., M. R. Bellon y G. Segura. 1995. Forest management options for sequestering carbon in Mexico. *Biomass and Bioenergy* 8: 357-367.
- Metherall, A. K., L. A. Harding, C. V. Cole y W. J. Parton. 1993. CENTURY soil organic matter model environment technical documentation, agroecosystem version 4.0, Great Plains System Research Unit, Tech Rep No. 4, USDA-ARS, Ft. Collins.
- Nabuurs, G. J., M. J. Schelhaas y A. Pussinen. 2000. Validation of the European Forest Scenario Model (EFISCEN) and a projection of Finish forests. *Silva Fenn.* 34: 167-179.
- Odum, E. P. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science* 164: 262-270.
- Ordóñez, J. A., B. H. J. de Jong y O. Masera. 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7: 27-47.
- Parresol, B. R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Can. J. For. Res.* 31: 865-878.
- Ponce-Hernández, R. 2004. Assessing carbon stocks and modeling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes. *FAO, Rome.* 156 pp.
- Richards, J. A. y X. Jia. 2006. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. Berlin: Springer. 439 pp.
- Running, S. W. y S. T. Gower. 1991. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiol.* 9: 147-160.
- Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. México D. F.: Limusa. 432 pp.
- Schulze, E.-D. 2006. Biological control of the terrestrial carbon sink. *Biogeosciences* 3: 147-166.
- Snowdon, P., Eamus, D., Gibbons, P., Khanna, P., Keith, H., Raison, J. y Kirschbaum, M. 2000. Synthesis of allometrics, review of root biomass and design of future woody biomass sampling strategies NCAS (National Carbon Accounting System) Technical Report No. 17. Australian Greenhouse Office. 113 pp.
- Snowdon, P., J. Raison, H. Keith, P. Ritson, P. Griereson, M. Adams, K. Montagu, H. Bi, W. Burrows y D. Eamus 2002. Protocol for Sampling Tree and Stand Biomass - NCAS (National Carbon Accounting System) Technical Report No. 31. Australian Greenhouse Office. 76 pp.
- Norma Oficial Mexicana NOM-ECOL-059-200. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 153 pp.