

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE SUELOS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**



**ORDENAMIENTO AGROFORESTAL Y EVALUACIÓN DE
SERVICIOS AMBIENTALES: ESTRATEGIAS PARA LA MITIGACIÓN
Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SURESTE
MEXICANO**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**



**DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES**

PRESENTA:

JUAN ANGEL TINOCO RUEDA

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO

2010

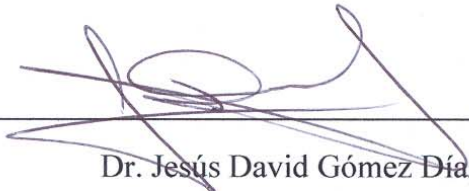


ORDENAMIENTO AGROFORESTAL Y EVALUACIÓN DE SERVICIOS AMBIENTALES:
ESTRATEGIAS PARA LA MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN
EL SURESTE MEXICANO

Tesis realizada por **Juan Angel Tinoco Rueda** bajo la dirección del Comité Asesor indicado,
aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

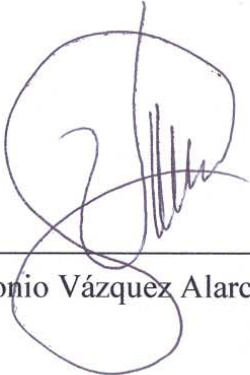
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE

DIRECTOR:



Dr. Jesús David Gómez Díaz

ASESOR:



Dr. Antonio Vázquez Alarcón

ASESOR:



Dr. Lakshmi Reddiar Krishnamurthy

“Las especies que sobreviven no son las especies más fuertes, ni las más inteligentes, sino aquellas que se adaptan mejor a los cambios”

Charles R. Darwin (1809 - 1882)

“Los grandes espíritus siempre han encontrado una violenta oposición de parte de mentes mediocres”

“Muchas son las cátedras universitarias, pero escasos los maestros sabios y nobles. Muchas y grandes son las aulas, más no abundan los jóvenes con verdadera sed de verdad y justicia”

Albert Einstein (1879 - 1955)

“Nunca desistas de un sueño, sólo trata de ver las señales que te lleven a él”

“Cuando quieres realmente una cosa, todo el Universo conspira para ayudarte a conseguirla”

Paulo Coelho (1947 -)

DEDICATORIAS

A MI PADRE DIOS por otorgarme la existencia y por ser mi maestro, amigo y guía en estos 28 años de camino.

A mis padres Angel Ignacio y Sonia por haberme dado la vida, por darme las más valiosa educación con su ejemplo de vida y por ser mis primeros maestros.

A mis hermanos Sonia María y José Ignacio, por su apoyo incondicional y por convivir juntos en todas las etapas de mi vida.

A mi esposa Iris Jetzabel por ser mi compañera de vida, por darme la dicha de ser padre, por todo el amor y el apoyo que me ha brindado en este tiempo que hemos estado juntos.

A mi hija Sunduri Jetzabel por todo el amor que a diario me brinda, por recordarme la presencia de los ángeles al ver su sonrisa y por darme la oportunidad de ser niño una vez más al jugar con ella.

A mis abuelas Sofía y Maura, y a mis abuelos Ignacio y Rafael, por cuidarme y apoyarme durante toda mi vida.

A mi sobrina Rafaela y mi sobrino Maximiliano, porque en ellos veo la sencillez e inocencia que a diario debemos cultivar.

A la Sra. Juanita Negrete y al Sr. Ismael Carrillo, así como a Edith, Maribel, Jorge, Oswaldo, Misael, Nestor, Cesar, Paulina y Rosalina; por haberme aceptado como un miembro más de su familia.

A mis amigos, especialmente a Rafael, Edgar, Rosa, Gris, Lore, Jazmín, Liliana, Elizabeth e Isabel.

A todos mis tíos, primos y sobrinos por darme su apoyo moral y cariño.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por darme la oportunidad de cursar mis estudios de Maestría en su honorable casa de estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado la beca para realizar mis estudios de Maestría.

A la Comisión Nacional del Agua y al Departamento de Suelos de la UACH por el financiamiento para la realización de la presente investigación a través del proyecto “Restauración hidrológica-ambiental de la parte media y alta de la cuenca del río Platanar, comprendida entre los estados de Tabasco y Chiapas”.

A mi esposa e hija, así como a mis padres y hermanos por su ayuda, cuidados y palabras de ánimo en la realización de la presente tesis.

Al Dr. Jesús David Gómez, al M.C. Alejandro Monterroso y al Dr. Jorge Etchevers; excelentes investigadores; por ser mis mentores y amigos, por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y por brindarme incondicionalmente sus amplios conocimientos y su confianza.

A los investigadores Dr. Antonio Vázquez, Dra. Claudia Hidalgo, Dr. Gregorio Angeles, Dr. Fernando Paz, Dr. Juan W. Estrada Berg, Dra. Rosa María García y Dr. L. Krishnamurthy, por brindarme su amistad y excelente ejemplo son su experiencia académica.

Al M.C. Carlos Tavarez por su ayuda en la incorporación de la tesis en el proyecto CONAGUA-UACH.

Al Dr. David Cristóbal por la revisión y los comentarios en la redacción de la presente tesis.

A la C. María Dolores Coronel Sánchez por la ayuda administrativa prestada a lo largo de mi estancia en el Departamento de Suelos.

Al Tec. Pedro Ignacio López Aguilar por la ayuda en el análisis de muestras de suelo en el laboratorio.

A la familia Carrillo Negrete por su ayuda y cuidados.

A mis compañeros de Maestría: Julia, Sandra, Adriana, Verónica, Francisco y Jeamy por brindarme su amistad.

DATOS BIOGRÁFICOS

Juan Angel Tinoco Rueda nació en el Distrito Federal, México el 11 de Mayo de 1982. Hijo de Angel Ignacio Tinoco Rodríguez y Sonia Rueda Medina, y hermano de Sonia María Tinoco Rueda y José Ignacio Tinoco Rueda. En Octubre de 2008 contrajo matrimonio con Iris Jetzabel Carrillo Negrete y en 2009 nació su primera hija llamada Sunduri Jetzabel Tinoco Carrillo. Actualmente la familia Tinoco Carrillo reside en Texcoco, Estado de México.

Juan Angel realizó sus estudios de preescolar (1985-1988), primaria (1988-1994) y secundaria (1994-1997) en el Colegio Cristóbal Colón ubicado en Naucalpan, Estado de México. Posteriormente en la ciudad de Texcoco, Estado de México ingresa a la preparatoria agrícola (1997-2000) de la Universidad Autónoma Chapingo, institución en donde realiza sus estudios profesionales dentro del Departamento de Suelos(2000-2004) y obtiene el título de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables el 14 de Octubre de 2005 con la defensa de la tesis titulada “Identificación y evaluación de patrones de distribución de 3 especies forestales en el estado de Hidalgo, su comportamiento actual y frente al cambio y vulnerabilidad climática”.

Desde el año 2005 forma parte de un grupo de investigadores del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo en donde ha desarrollado proyectos de investigación y servicio en temas como sistemas de información geográfica, ordenamiento territorial, zonificación agroecológica, cambio climático, servicios ambientales, inventarios de carbono, entre otros. Ha participado en numerosos congresos y simposios nacionales e internacionales presentando los resultados de las investigaciones desarrolladas; además ha impartido cursos referentes a los sistemas de información geográfica y percepción remota. Hasta la fecha ha publicado diez artículos científicos en revistas con arbitraje, un libro y seis capítulos de libros. Desde el año 2009 ha formado parte del jurado de tesis de licenciatura en el Departamento de Suelos. Es miembro de la Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (Capítulo México), de la Asociación Mexicana de Arboricultura, de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo y del consorcio CABEMAS del Programa Mexicano del Carbono. En enero de 2009 inicia sus estudios de posgrado en la Universidad Autónoma Chapingo al ser aceptado en la Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, los cuales culminan en Diciembre de 2010.

RESUMEN

ORDENAMIENTO AGROFORESTAL Y EVALUACIÓN DE SERVICIOS AMBIENTALES: ESTRATEGIAS PARA LA MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SURESTE MEXICANO

En la presente investigación se evaluaron los servicios ambientales de captura de carbono en la parte aérea y subterránea y la recarga de agua hacia el subsuelo en la cuenca del Río Platanar, estado de Chiapas. Además se desarrolló una metodología denominada ordenamiento agroforestal en donde se proponen sistemas agroforestales con base en las características e indicadores de diagnóstico del paisaje. Para la estimación del contenido de carbono en la parte aérea se delimitaron unidades de integración territorial (UIT) en las cuales se establecieron parcelas de muestreo de 400 m² en donde se realizó un inventario florístico y se calculó el índice de valor de importancia a cada especie encontrada. Para las especies más representativas de cada comunidad vegetal se buscaron ecuaciones alométricas para estimar su contenido de materia seca y posteriormente su contenido de carbono al aplicar el factor de 0.5. Para estimar el contenido de carbono orgánico en el suelo se obtuvieron muestras simples de suelo en cada UIT a una profundidad de 30 cm, además, se abrieron cinco perfiles de suelo para poder clasificar el suelo en los cuales se tomaron muestras, el suelo colectado se llevó a laboratorio para su análisis. Dentro de las determinaciones realizadas a las muestras se encuentran el valor de densidad aparente y porcentaje de materia orgánica, los cuales se utilizaron para estimar el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) en cada UIT. La estimación de la recarga de agua se delimitaron a escala regional las isotermas e isoyetas en la cuenca, posteriormente se realizó un balance de humedad en el suelo con el cual se obtuvieron variables hidrológicas como la evapotranspiración potencial y actual, el escurrimiento, el déficit de humedad, entre otras. Con estas variables se cuantificó la recarga de agua hacia el subsuelo. Por su parte para la propuesta ordenamiento agroforestal se elaboró la cartografía detallada de los atributos pendiente, cobertura vegetal, temperatura,

precipitación y características del suelo. De forma similar se evaluaron los indicadores de diagnóstico erosión hídrica, calidad ecológica, fragilidad natural, zonas riparias y condición actual de la vegetación. Con la cartografía obtenida se desarrolló un sistema de información geográfica para posteriormente aplicar una evaluación multicriterio y proponer tecnologías agroforestales en cada una de las unidades geográficas resultantes. Como resultados principales se encontró que a comunidad selva alta perennifolia con vegetación secundaria fue en donde se encontró la mayor cantidad de carbono en la parte aérea con 99.7 MgC ha⁻¹. La comunidad pastizal cultivado, que registra la mayor superficie en la cuenca con 31,153.8 hectáreas, reporta un contenido de carbono de 10 MgC ha⁻¹. En la estimación del COS, las UIT ubicadas en los sistemas terrestres Lomeríos y Planicie Aluvial se registra la mayor cantidad de COS a 30 cm de profundidad (> 96.6 MgC ha⁻¹). En el sistema terrestre Cañadas se identificaron zonas degradadas en las que el contenido de COS es el más bajo en toda la cuenca (< 7.2 MgC ha⁻¹). La recarga de agua fue mayor en la zona Noroeste de la cuenca es en donde se registra la mayor lámina de agua infiltrada con un intervalo de 500 a 550 mm anuales, por el contrario las zonas con menor lámina infiltrada se ubican en el Sureste y presentan valores de 300 a 350 mm anuales. Con la propuesta de ordenamiento agroforestal se obtuvieron nueve sistemas agroforestales, de los cuales el sistema árboles dispersos en potreros es el que abarca la mayor superficie con el 25.5 % de la superficie total de la cuenca. Se considera que las tecnologías agroforestales propuestas son opciones viables para la mitigación y adaptación al cambio climático ya que se incrementaría el carbono en la parte aérea y subterránea, y a su vez se diversificarían los productos para autoconsumo o para la venta por parte de los habitantes de la cuenca.

PALABRAS CLAVE: captura de carbono, servicios ambientales hidrológicos, cambio climático, planificación agroforestal

ABSTRACT

AGROFORESTRY PLANNING AND ENVIRONMENTAL SERVICES EVALUATION: STRATEGIES OF MITIGATION AND ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN MEXICAN SOUTHEAST

In the present research the environmental services carbon sequestration in above and belowground and water recharge, were evaluated in Rio Platanar basin. Also a methodology to design agroforestry systems considering landscape attributes and indicators was created. To estimate carbon sequestration in aboveground it was delimited integration territorial units (ITU) and established sample plots of 400 m², a floristic inventory have done in each sample plot to calculate the ecological importance index. We search allometric equations for the most representative species to estimate the total biomass and carbon content applying the 0.5 factor. To estimate soil organic carbon (SOC) soil samples were collected in each ITU at 30 cm deep; also, five soil profiles were opened to classify the soil and take samples. In laboratory the samples were analyzed and the data of bulk density and percent of organic matter were used to estimate the SOC content in each ITU. The methodology used to calculate the water recharge begins with the regional delimitation of precipitation and temperature zones; a water balance was applied to obtain the hydrological variables: actual and potential evapotranspiration, runoff, water deficit and others. With these variables water recharge in basin was estimate. To obtain the propose of agroforestry systems it was obtained detail cartography of the attributes slope, actual land use, temperature, precipitation and soil properties. Also five indicators was evaluated rainfall erosion, ecological quality, riparian zones and actual vegetation condition. With these products a geographical information

system was created to analyze them with a multi-criteria evaluation and proposed agroforestry technologies in each geographic unit. The main results show that in the community perennial forest was found the highest carbon content in aboveground with 99.7 MgC ha⁻¹. The grassland community is the dominant ecosystem with 31,153.8 ha in the watershed and reports a carbon content of 10 MgC ha⁻¹. About the SOC estimation, the terrestrial systems Lomerios and Planicie Aluvial have the biggest content of COS (> 96.6 MgC ha⁻¹). In the system Cañadas we can identified degraded areas with low COS content at 30 cm deep (< 7.2 MgC ha⁻¹), these areas with no vegetation cover can suffer an increment in surface if they are not managed with soil conservation practice. The northwest region is the principal infiltration area with annual values of 500 to 550 mm. The southeast of basin reports the lowest infiltration with 300 to 350 mm per year. It was concluded that alternative productive technologies could increment the water recharge volume and the possibility of economic payment to the people for the hydrologic environmental services. As results of agroforestry propose, nine agroforestry systems were obtain, which trees scattered in a pasture is the dominant system with 25.5 % of the basin area. The proposed systems were considering as climate change mitigation and adaptation strategies, because the carbon in above and belowground could increment, and the population could have more diversification of products to consume or selling.

KEY WORDS: carbon sequestration, hydrologic environmental services, climate change, agroforestry planning

Contenido

RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
ABREVIATURAS USADAS.....	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
Ordenamiento agroforestal.....	6
<i>Sistemas agroforestales</i>	6
<i>Ordenamiento territorial</i>	12
Servicios ambientales.....	16
<i>Captura de carbono</i>	17
<i>Recarga de agua</i>	20
Cambio climático	23
<i>Gases de efecto invernadero</i>	23
<i>Impactos</i>	24
<i>Mitigación</i>	28
<i>Adaptación</i>	31
Literatura citada	36
CAPÍTULO III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	42
Objetivo general.....	42
Objetivos específicos	42
Hipótesis	42
CAPÍTULO IV. EL ÁREA DE ESTUDIO	44
Localización.....	44
Topografía.....	44
Fisiografía	47
Geología.....	47

Clima.....	51
Hidrología	53
Suelo	54
Uso de la tierra.....	55
Biodiversidad	57
Literatura citada	60
CAPÍTULO V. DETERMINACIÓN DE LOS ALMACENES DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DE LOS ECOSISTEMAS DE LA CUENCA DEL RÍO PLATANAR, CHIAPAS	62
Resumen.....	62
Abstract.....	62
Introducción	63
Materiales y Métodos.....	66
Resultados y Discusión	69
Conclusiones	76
Agradecimientos	79
Literatura citada	80
CAPÍTULO VI. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO PLATANAR, CHIAPAS.....	84
Resumen.....	84
Summary	84
Introducción	85
Materiales y Métodos.....	88
Resultados y Discusión	90
Conclusiones	96
Agradecimientos	97
Literatura citada	98
CAPÍTULO VII. EVALUACIÓN DEL SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO PLATANAR, CHIAPAS	101

Resumen.....	101
Abstract.....	101
Introducción	102
Metodología	105
Resultados	109
Discusión y Conclusiones	113
Agradecimientos	116
Referencias.....	116
CAPÍTULO VIII. EL ORDENAMIENTO AGROFORESTAL COMO UNA ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: CASO DE ESTUDIO CUENCA DEL RÍO PLATANAR, CHIAPAS	119
Resumen.....	119
Abstract.....	120
Introducción	120
Materiales y Métodos.....	124
Resultados	126
Discusión y Conclusiones	133
Agradecimientos	134
Referencias.....	135
CONCLUSIONES GENERALES.....	138
RECOMENDACIONES	140

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Superficies de los municipios que se encuentran en la cuenca del Río Platanar.....	44
Cuadro 2. Superficie por intervalo de pendiente en la cuenca del Río Platanar	46
Cuadro 3. Orientación de la pendiente en la cuenca del Río Platanar	47
Cuadro 4. Superficie por tipo de roca presente en la cuenca del Río Platanar.....	49
Cuadro 5. Normales climáticas de la estación meteorológica Platanar de arriba	53
Cuadro 6. Características físicas de la cuenca del Río Platanar.....	54
Cuadro 7. Superficie por tipo de suelo presente en la cuenca del Río Platanar	55

Cuadro 8. Características de los sistemas terrestres de la cuenca del Río Platanar	70
Cuadro 9. Índice de valor de importancia de las especies con mayor densidad por comunidad vegetal	77
Cuadro 10. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de biomasa aérea	78
Cuadro 11. Contenido de biomasa y carbono por especie	78
Cuadro 12. Características de los sistemas terrestres de la cuenca del Río Platanar	92
Cuadro 13. Características de los perfiles de suelo en la cuenca del Río Platanar	95
Cuadro 14. Estaciones meteorológicas en la zona de influencia de la cuenca del río Platanar .	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la cuenca del Río Platanar	45
Figura 2. Modelo digital de elevación de la cuenca del Río Platanar	45
Figura 3. Distribución de la pendiente en la cuenca del Río Platanar.....	46
Figura 4. Fisiografía de la cuenca del Río Platanar	48
Figura 5. Tipos de roca en la cuenca del Río Platanar	50
Figura 6. Tipos de rocas reportados por el SGM para la cuenca del Río Platanar.....	50
Figura 7. Isolíneas de temperatura y precipitación media anual en la cuenca del Río Platanar...	52
Figura 8. Hidrología superficial de la cuenca del Río Platanar.....	54
Figura 9. Tipos de suelo en la cuenca del Río Platanar	56
Figura 10. Usos de la tierra en la cuenca del Río Platanar.....	57
Figura 11. Comunidades vegetales en la cuenca del Río Platanar	58
Figura 12. Unidades de integración territorial de la cuenca del Río Platanar	71
Figura 13. Ubicación de las parcelas de muestreo establecidas para realizar el inventario florístico	73
Figura 14. Contenido de carbono en la biomasa aérea en la cuenca del Río Platanar	79
Figura 15. Unidades de integración territorial de la cuenca del Río Platanar	93
Figura 16. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo	94
Figura 17. Comportamiento del carbono orgánico en el suelo en los perfiles analizados (a-Aparato Volcánico, b-Cañadas 1, c-Cañadas 2, d-Lomeríos, e-Planicie Aluvial)	96
Figura 18. Contenido de carbono orgánico en el suelo en la cuenca del Río Platanar.....	97
Figura 19. Precipitación media anual en la cuenca del Río Platanar	110
Figura 20. Temperatura media anual en la cuenca del Río Platanar	111
Figura 21. Balance hídrico mensual en la cuenca del Río Platanar	112
Figura 22. Recarga de agua anual en el subsuelo en la cuenca del Río Platanar	113
Figura 23. Caracterización detallada de la cuenca del Río Platanar (a-pendiente, b-vegetación, c-temperatura media anual, d-precipitación media anual)	129

Figura 24. Indicadores de diagnóstico en la cuenca del Río Platanar (a-erosión hídrica, b-calidad ecológica, c-fragilidad natural, c-zonas riparias)	130
Figura 25. Ordenamiento agroforestal en la cuenca del Río Platanar.....	132

ABREVIATURAS USADAS

AYAUM – Árboles y arbustos de uso múltiple
CH₄ – metano
CMNUCC - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO₂ – dióxido de carbono
CONAFOR – Comisión Nacional Forestal
COP – conferencia de las partes de la CMNUCC
ENACC – Estrategia nacional de cambio climático
ENSO – El Niño Southern Oscillation
GCM – General circulation model
GEI – gases de invernadero
Gg - Gigagramos
HFC – hidrofluorocarbonos
ICRAF – International Council for Research in Agroforestry
INEGEI – Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero
IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change
lps – litros por segundo
MgC ha⁻¹ – Megagramos de carbono por hectárea
MgMS ha⁻¹ – Megagramos de materia seca por hectárea
MIAF – milpa intercalada con árboles frutales
Mm - milímetros
msnm – metros sobre el nivel del mar
MtCO₂e – Megatoneladas de dióxido de carbono equivalente
MtCO₂e ha⁻¹ a⁻¹ – Megatoneladas de dióxido de carbono equivalente por hectárea al año
N₂O – óxido nitroso
OAF – Ordenamiento agroforestal
OT – Ordenamiento territorial
PAF – Práctica agroforestal
PECC – Programa especial de cambio climático
PFC – perfluorocarbonos
ppm – partes por millón
PSA – Pago por servicios ambientales
REDD - Reducing Emissions from Deforestation and Degradation
SAF – Sistema agroforestal
SF₆ – hexafluoruro de azufre
TAF – Tecnología agroforestal
UIT – Unidades de Integración Territorial
USCUSS – Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura
WAC – World Agroforestry Centre

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

A partir de la revolución industrial se ha observado un incremento en las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero dióxido de carbono, metano, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, entre otros. Los gases de efecto invernadero (GEI) permiten el paso de un porcentaje de la radiación de onda corta proveniente del sol a través de la atmósfera, al llegar a la superficie terrestre parte de esta radiación es reflejada nuevamente a la atmósfera pero ahora con longitud de onda larga o también llamada infrarroja. Al recibir la radiación infrarroja, los GEI reflejan parte de ella nuevamente hacia la superficie terrestre evitando así que escape al espacio exterior, lo que genera un incremento en la temperatura global; a este proceso se le conoce como efecto invernadero y tiene una relación directa entre la concentración de gases de invernadero y la temperatura del planeta. El efecto invernadero es uno de los factores que propician las condiciones favorables para el desarrollo de la vida en la Tierra, ya que sin los GEI la temperatura promedio del planeta sería de -15°C aproximadamente.

El incremento actual de los GEI atmosféricos es originado principalmente por la quema de combustibles fósiles, los cuales son la principal fuente de energía que mantienen a la economía y el estilo de vida humana actuales. A partir del año 1992 se reconoce formalmente el problema del cambio climático venidero a nivel internacional a través de la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) la cual tienen por objetivo último la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. En la tercera conferencia de las partes (COP3) de la CMNUCC realizada en Japón en 1997, se adoptó el Protocolo de Kyoto, documento en donde se establece que 39 países enlistados en el Anexo B del protocolo están obligados a disminuir sus emisiones de gases de invernadero en al menos 5 % con

respecto a las emisiones de 1990, en el periodo de compromiso comprendido entre 2008 y 2012.

Esta restricción de disminuir las emisiones de GEI no ha sido bien recibida por muchos de los países que están dentro del Anexo B y algunos de ellos han decidido no firmar el Protocolo de Kyoto y buscar sus propios métodos para disminuir el cambio climático. La principal justificación en la que se basan estos países es que la economía y el estilo de vida de la mayoría de los seres humanos actuales, están basados en el petróleo, el cual al ser transformado y usado por ejemplo en forma de gasolina o de gas licuado de petróleo, libera gases de invernadero, principalmente dióxido de carbono. El panorama ideal para frenar el cambio climático sería sustituir el petróleo por otras fuentes de energía menos contaminantes y renovables como la eólica, la solar, entre otras; sin embargo, este cambio significaría modificar desde la mayoría de los procesos industriales hasta la infraestructura de las viviendas y algunos aparatos electrónicos y automóviles que usamos cotidianamente.

A raíz de este problema socioeconómico, se han ideado otras estrategias para mitigar el cambio climático, dentro de las cuales se encuentra el secuestro del dióxido de carbono en la biomasa vegetal y en el suelo. Esta idea se basa en la fisiología de los organismos autótrofos que transforman el CO_2 atmosférico en productos orgánicos a través de la fotosíntesis; y que al morir o al desechar follaje, ramas o raíces, el carbono contenido en estos componentes pasa al reservorio hojarasca, mantillo o suelo. El océano se ubica como uno de los mayores reservorios de carbono, en donde el fitoplancton lo utiliza para la fotosíntesis, y además el CO_2 disuelto reacciona con el agua formando ácido carbónico y sus productos de disociación como el bicarbonato y el carbonato, los cuales también se consumen por fotosíntesis. Los exoesqueletos de calcio de algunos organismos reaccionan por igual con el CO_2 formando carbonato de calcio (CaCO_3), el cual es depositado en el fondo marino. Estos procesos de captura de carbono son relativamente estables y constantes bajo condiciones naturales, pero la intervención de las actividades humanas altera este ciclo, lo que genera una merma en la capacidad de secuestro de carbono de los ecosistemas. El mismo calentamiento atmosférico o el incremento de las concentraciones de CO_2 , alteran la capacidad fotosintética de algunos

organismos, como ciertas especies de plantas que al sentir una mayor concentración de dióxido de carbono en vez de capturar carbono, lo emiten a la atmósfera. En el océano sucede algo similar, al incrementarse las concentraciones de carbono en el agua, el pH de ésta cambia afectando a los organismos autótrofos y modificando la tasa de secuestro de carbono.

Dentro de los proyectos de secuestro de carbono se encuentran las estrategias REDD (Reducción de Emisiones por la Deforestación y la Degradación de los bosques) y las estrategias REDD+ o REDD Plus que además de reducir las emisiones por evitar la deforestación y la degradación forestal, contribuyen a la conservación, manejo sostenible de los bosques y mejoramiento de las existencias de carbono forestal, además, tienen el potencial de generar beneficios sociales y ambientales. En esencia estas estrategias fomentan una remuneración económica a los proyectos, propietarios de los terrenos, o países que demuestren mantener e incrementar la biomasa por unidad de superficie. Oros esquemas desarrollados para fomentar la captura de carbono son los mercados de créditos de carbono, en los cuales existe un comprador (que por lo general son países o empresas que dentro de sus procesos industriales emiten dióxido de carbono), y por el otro lado existe un vendedor (que pueden ser por igual países o grupo de personas propietarias de terrenos forestales que brindan el servicio ambiental de captura de carbono), con la finalidad de que el comprador le pague al vendedor un monto establecido por tonelada de carbono y a su vez se le entregue una constancia en donde se plasma la cantidad de carbono comprado.

Para poder implementar los ejemplos de proyectos de captura de carbono antes expuestos, es necesario realizar el inventario de carbono dentro de la finca o la superficie de interés. Existen métodos para realizar el inventario que van desde la medición indirecta a través del uso de cartografía temática o imágenes satelitales, hasta los más detallados con base en muestreos directos en campo. Estos muestreos tienen la finalidad de medir el carbono contenido en los reservorios biomasa, suelo, y en algunos casos, agua. Para el caso de la biomasa se pueden utilizar ecuaciones alométricas que relacionan la materia seca de un organismo o de una parte del organismo (tronco, hojas, ramas, raíces) con atributos dasométricos del individuo como pueden ser altura total o

diámetro normal. La desventaja de utilizar ecuaciones alométricas elaboradas en un lugar diferente al que se está estudiando, es que se puede subestimar o sobrestimar la cantidad de materia seca debido a la variabilidad intrínseca del desarrollo de la planta y que está compuesta por las condiciones del paisaje, disturbios ocurridos, o simplemente por la genética particular del individuo. Ahora bien, el uso de ecuaciones alométricas puede disminuir los tiempos del inventario o bien ser usadas cuando existe algún inconveniente de índole social y no es posible realizar el muestreo extractivo.

En el caso del reservorio suelo, el inventario directo es el mejor método para cuantificar el contenido de carbono, éste se realiza ajustando el tipo de muestreo a las condiciones particulares y superficie del área de estudio. El detalle del muestreo puede variar, ya que se pueden obtener muestras compuestas utilizando una barrena cilíndrica o bien abrir perfiles pedológicos y extraer muestras simples de cada horizonte. Las muestras de suelo obtenidas son enviadas al laboratorio para determinar sus características físico-químicas, y dependiendo del tipo de equipo con que se cuente se puede cuantificar directamente el contenido de carbono o estimarlo con base en el contenido de materia orgánica. En la literatura especializada se pueden encontrar diversos manuales que detallan los métodos para cuantificar el carbono en los diferentes reservorios.

El inventario o línea base de carbono también sirve para alimentar a los modelos que tienen por finalidad simular el comportamiento de este elemento a través del tiempo y bajo diferentes escenarios de manejo. Tal es el caso del modelo CBM-CFS3 desarrollado por el Servicio Forestal de Canadá, el cual estima el contenido de carbono en el suelo y en la biomasa a futuro con base en el manejo forestal y atributos de la especie y el paisaje.

Además de las estrategias de mitigación al cambio climático que se enfocan en disminuir la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, existen otro tipo de estrategias denominadas de adaptación al cambio climático. En ellas la premisa fundamental es buscar la forma de cómo los sistemas humanos (ciudades, agroecosistemas, etc.) y los naturales (ecosistemas), pueden modificar su composición y estructura para adecuarse a las nuevas condiciones climáticas. En el sector forestal y agrícola, las estrategias de adaptación consideran principalmente la reubicación de

especies animales y vegetales con base en sus intervalos óptimos y limitantes de desarrollo; o bien, recurrir a la agricultura protegida y construir invernaderos para la producción de alimentos u otros productos.

Una de las opciones recomendadas por diversas instituciones internacionales y nacionales debido a la dualidad que posee para fungir como estrategia de mitigación y adaptación es la agroforestería. La fortaleza de los sistemas agroforestales radica en su diseño base, el cual es el establecimiento deliberado de leñosas perennes en conjunto con cultivos y/o animales. Estos sistemas funcionan como estrategia de mitigación ya que al incrementar el número de especies vegetales por unidad de superficie se captura una mayor cantidad de carbono tanto en la biomasa como en el suelo, y funcionan como estrategia de adaptación ya que el dueño de la finca que implementa algún sistema agroforestal diversifica los productos de los cuales obtiene sus ingresos económicos, y de presentarse algún evento climático extraordinario, tiene mayor capacidad de resiliencia a diferencia de un sistema de monocultivo.

Otros servicios ambientales que proveen los sistemas agroforestales es el incremento de la recarga de agua hacia los acuíferos, disminución del aporte de fosfatos hacia los cauces de agua en el caso de la agroforestería riparia, relaciones de mutualismo o comensalismo entre leñosas y animales o cultivos anuales, entre otros.

Es por lo anterior que el objetivo primordial de la presente investigación fue desarrollar una metodología denominada ordenamiento agroforestal para potenciar la producción de los servicios ambientales de captura de carbono y recarga de agua hacia el subsuelo, además de evaluar sus beneficios como estrategia de adaptación al cambio climático.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

Ordenamiento agroforestal

El ordenamiento agroforestal (OAF) es una propuesta novedosa para la planificación del uso de la tierra que tiene por finalidad identificar las tecnologías agroforestales más adecuadas para una determinada superficie con base en los atributos del paisaje e indicadores de diagnóstico del medio biofísico y socioeconómico. Los resultados del OAF son mapas temáticos de la caracterización y diagnóstico del medio biofísico y socioeconómico, así como la distribución espacial de los sistemas agroforestales dentro de la zona de estudio. Aunado a la cartografía se anexan las fichas técnicas de cada sistema agroforestal que incluye los componentes: especies de árboles y arbustos de uso múltiple identificados mediante recorridos de campo y entrevistas en las poblaciones, así como los cultivos y especies animales que se pueden aprovechar en los diferentes sistemas propuestos. El arreglo espacial de los componentes también se incluye en las fichas técnicas.

Para el desarrollo del OAF es necesario comprender las definiciones y procedimientos del diseño de sistemas agroforestales así como del ordenamiento territorial, a continuación se describen las principales características de estos dos conceptos.

Sistemas agroforestales

La agroforestería se define de manera general como el establecimiento deliberado de árboles y/o arbustos de uso múltiple en combinación con cultivos agrícolas y/o con especies animales. Aunque diversos autores han definido a la agroforestería con sus propias palabras, la esencia del concepto es la misma, a continuación se presentan algunos ejemplos:

El cultivo deliberado de especies leñosas en la misma unidad de tierra con cultivos agrícolas y/o animales en alguna forma de mezcla espacial o secuencial (Nair, 1997).

Es el cultivo de árboles en combinación interactiva con cultivos anuales y/o la cría de animales en la misma unidad de tierra (Krishnamurthy *et al.*, 2003).

Es la forma de manejo de la tierra donde se combinan plantas leñosas perennes como árboles, arbustos, palmas o gramíneas de porte alto (como el bambú) con los cultivos agrícolas o animales (Soto *et al.*, 2008).

A partir del concepto de agroforestería surge el término de sistema agroforestal. Un sistema agroforestal (SAF) es un sistema de producción de alimentos con cultivo de árboles en combinaciones interactivas con animales y/o cultivos. Los SAF pueden estar diseñados con base en conocimientos empíricos, los cuales se denominan prácticas agroforestales (PAF); o bien pueden estar diseñados con base en técnicas y conocimientos obtenidos por medio del método científico, a los cuales se identifica como tecnología agroforestal (TAF). Un concepto clave dentro de los sistemas agroforestales es el de árbol y arbusto de uso múltiple (AYAUM). Un AYAUM es una perenne leñosa cultivada deliberadamente para aportar más de una contribución importante a la producción o servicio (por ejemplo, protección, sombra, sostenibilidad de la tierra) del sistema de uso de la tierra que ocupa. El concepto de AYAUM es tan importante en la agroforestería que un sistema no se puede llamar agroforestal si no tiene presente al menos un árbol o arbusto de uso múltiple (Nair, 1997; Krishnamurthy y Ávila, 1999; Krishnamurthy *et al.*, 2003).

Existen diversas clasificaciones para diferenciar y nombrar a los sistemas agroforestales, una de las más usadas es por medio del análisis estructural, la cual hace uso de los términos presencia y arreglo. La presencia hace referencia a que componentes están presentes en el sistema (perennes leñosas, cultivos, animales), estos componentes definen a las cuatro categorías estructurales de las TAF: tecnologías agrisilvícolas (cultivos y leñosas perennes), silvopastoriles (perennes leñosas y animales), agrosilvopastoriles (cultivos, perennes leñosas y animales) y otras tecnologías específicas como por ejemplo la entomoforestería (insectos y perennes leñosas), acuaforestería (especies acuáticas y perennes leñosas) y huertos caseros (multiespecies). El arreglo u orden espacial tiene que ver con la ubicación física de los componentes en la parcela. También es importante describir el arreglo temporal (o secuencia) porque los diferentes componentes pueden

estar en la parcela al mismo tiempo, ser secuenciales o sobreponerse parcialmente en el tiempo (Torquebiau, 1993; Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Los principales tipos de arreglos o disposición de los componentes se describen a continuación:

Arreglo zonal. Los diferentes componentes están geométricamente arreglados, como por ejemplo filas de árboles y cultivo en callejones barreras rompevientos, setos vivos, etc.

Arreglo mixto. Los diferentes componentes no están geométricamente arreglados o dispuestos, pero aparecen de manera irregular. Algunos ejemplos son árboles dispersos en tierras de cultivo, jardines domésticos o acuacultivo en áreas de manglares.

Disposición densa. Los componentes están juntos estrechamente en la parcela, por ejemplo en algunos cultivos en callejones.

Disposición dispersa. Los componentes están lejos unos de otros, por ejemplo árboles dispersos en potreros, o hileras de árboles en diques de campos de arroz.

Disposición de estratos simples. Existe únicamente una capa de árboles, por ejemplo cultivos en callejones, setos vivos, o rompevientos con una sola especie.

Disposición multiestrato. Existen varias capas de árboles, por ejemplo en la mayoría de los hurtos caseros o en jardines boscosos, en parcelas de usos múltiples o en rompevientos con dos o más especies que tienen diferentes dimensiones.

Disposición simultánea. Los diferentes componentes están presentes en la misma parcela simultáneamente, como por ejemplo árboles en un potrero o árboles en asociación con cultivos perennes.

Disposición secuencial. Los diferentes componentes no están presentes en la parcela simultáneamente, van uno detrás del otro, por ejemplo árboles en barbecho alternando con el uso clásico de la tierra agrícola. Los componentes también pueden sobreponerse parcialmente en tiempo, por ejemplo la plantación de árboles para un barbecho mejorado antes del fin del ciclo agrícola.

En las siguientes líneas se describen de forma general las principales características de los sistemas agroforestales más comunes.

Acahual mejorado. También llamado barbecho mejorado, este sistema agroforestal se desarrolla en porciones de tierra en donde se ha dejado de desarrollar la agricultura y el terreno está en “descanso”. Se le denomina mejorado ya que deliberadamente se plantan árboles o arbustos de uso múltiple para su aprovechamiento en el futuro. Este SAF se aplica generalmente en tierras degradadas y las leñosas perennes que se establecen sirven para disminuir la erosión del suelo. Algunos experimentos en el diseño de acahuales mejorados han utilizado especies como el jaul o aliso (*Alnus acuminata*), la amapola (*Pseudobombax ellipticum*), cocohite (*Gliricidia sepium*), corcho balsa (*Ochroma pyramidale*), entre otras (Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Sistema taungya. El sistema taungya comprende el establecimiento de árboles maderables en combinación con cultivos. Los cultivos se establecen al mismo tiempo que la plantación de leñosas, pero únicamente se mantienen en la finca hasta que las especies arbóreas cubren el dosel. Este SAF es muy popular en lugares donde se presenta la agricultura migratoria y a los habitantes que no son poseedores de fincas se les permite aprovechar los beneficios de los cultivos. Especies como el cedro rojo (*Cedrela odorata*), la caoba (*Swietenia macrophylla*) o la teca (*Tectona grandis*) son algunas de las especies que se utilizan como componentes leñoso perenne en los sistema taungya (Nair, 1997).

Huerto casero. Este SAF se desarrolla como una práctica de traspatio en las viviendas. Por lo general las mujeres del hogar son las que se dedican al cuidado del huerto casero en donde se pueden albergar una gran diversidad de especies vegetales tanto medicinales, aromáticas, comestibles, de ornato, etc. Así mismo se puede encontrar el componente animal o la producción de hongos (Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Cultivo en callejones. En este SAF se combinan los componentes cultivos anuales y especies leñosas perennes. El arreglo espacial del cultivo en callejones es en forma de hileras de árboles o arbustos de uso múltiple, preponderantemente especies fijadoras de nitrógeno, y entre ellas se establecen hileras de cultivos anuales. La finalidad de este

sistema es el incremento de la fertilidad del suelo mediante el aporte de biomasa por parte de los AYAUM y la simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno. Como ejemplo de especies leñosas que se utilizan en estos sistemas se pueden mencionar a la leucaena (*Leucaena leucocephala*), el tiamo (*Acacia glomerosa*), la acacia (*Acacia pennatula*) o la guácima (*Guazuma ulmifolia*) (Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Árboles dispersos en potreros. En este sistema agroforestal se establecen AYAUM dentro de las áreas de pastoreo de las fincas ganaderas. La disposición espacial de las leñosas que se mantiene es por lo general dispersa. El objetivo principal de este sistema es el aprovisionamiento de sombra y en algunos casos alimento para el ganado, además de nutrientes y protección contra la insolación para las especies forrajeras, o bien, alimento para consumo humano o materiales para construcción o leña. Algunas especies leñosas que se utilizan para el diseño de este SAF son la leucaena (*Leucaena leucocephala*), el ramón (*Brosimum alicastrum*), la costilla de vaca (*Atriplex canescens*), el mezquite (*Prosopis* spp.) y la guácima (*Guazuma ulmifolia*) (Nair, 1997).

Cultivo-plantación. El componente predominante en este sistema son plantaciones de AYAUM, y los cultivos se establecen en los estratos bajos e intermedios de la finca. Se asemeja al sistema taungya con la diferencia de que los cultivos están presentes en todo momento. Algunos ejemplos del SAF cultivo-plantación en la zona tropical de México son la combinación del hule (*Hevea brasiliensis*) con palma camedor (*Chamaedorea elegans*), en esta asociación se aprovecha el hule para la producción de látex y otros productos, y las hojas de la palma para arreglos florales, tinta para la elaboración de billetes, etc. (Nair, 1997).

Barreras rompevientos. La finalidad de estos sistemas es reducir la velocidad del viento que impacta a las fincas. El arreglo es en forma de hileras perpendiculares a la dirección del viento, puede estar compuesto por una o por varias especies ordenadas en diferentes estratos para incrementar la protección. Algunas especies que se utilizan para el diseño de las barreras rompevientos son la leucaena (*Leucaena leucocephala*), la cassia amarilla (*Cassia siamea*), el cocohite (*Gliricidia sepium*) o el gandul (*Cajanus cajan*) (Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Cercos vivos. Los cercos vivos son sistemas agroforestales que cumplen con la función de delimitar las fincas o diferentes partes de ella. El diseño de este SAF es en forma de hileras que se establecen a lo largo de un determinado polígono. En el trópico mexicano especies como el cocohite (*Gliricidia sepium*), el colorín (*Erythrina* spp.) o el palo mulato (*Bursera simaruba*), son usados comúnmente para los cercos vivos (Krishnamurthy *et al.*, 2003).

Milpa intercalada con árboles frutales. El sistema MIAF está compuesto por el cultivo de maíz, una o dos leguminosas comestibles u otra especie anual comercial de porte bajo, en asociación con árboles frutales; los componentes se establecen en surcos e hileras intercalados (Cortés *et al.*, 2005). El sistema MIAF empezó a implementarse en las zonas de ladera del norte de Oaxaca y se ha extendido hasta la región centro del país y a los estados de Chiapas y Guerrero. Las especies frutales que son usadas con mayor frecuencia para el diseño de este sistema son el durazno (*Prunus* spp.), la manzana (*Malus* spp.) y el ciruelo (*Spondia* spp.).

Para poder desarrollar sistemas agroforestales viables y adoptables es necesario realizar un proceso de investigación agroforestal de la unidad de tierra que se vaya a estudiar. Este proceso se divide en las etapas de caracterización, diagnóstico, experimentación, análisis de políticas, prueba de sistemas propuestos, difusión, adopción y análisis de impactos. El producto principal es la lista de los SAF y sus respectivas fichas técnicas en donde se especificará como mínimo las especies de AYAUM, su arreglo espacial, los regímenes de manejo (manejo del árbol y sus componentes asociados) y los niveles de desempeño (criterios biofísicos y socioeconómicos). El método más usado para el diseño de SAF es el Diagnóstico y Diseño, o D&D, el cual es una familia de procedimientos para describir y analizar los sistemas actuales de uso de la tierra, para identificar las restricciones de la producción y factores causales, así como para diseñar tecnologías agroforestales apropiadas y programas de investigación (Raintree, 1983). La metodología D&D fue creada en 1977 por el International Council for Research in Agroforestry (ICRAF), ahora llamado World Agroforestry Centre (WAC), con la finalidad de desarrollar una metodología multidisciplinaria para la planeación del desarrollo agroforestal. Esta inquietud de los investigadores del ICRAF se basó en la

filosofía de que el conocimiento de un sistema existente del uso de la tierra (el diagnóstico) es esencial para planificar y evaluar programas significativos de desarrollo e investigación (el diseño) (Nair, 1997; Krishnamurthy y Ávila, 1999).

A continuación se describen las cinco etapas en las que se divide la metodología D&D (Nair, 1997; Soto *et al.*, 2008):

Prediagnóstico. Se realiza la definición del sistema del uso de la tierra y selección del sitio. A través de reuniones de trabajo se intercambia información técnica y social. Se definen los alcances, objetivos y compromisos para actividades del diagnóstico y diseño agroforestal.

Diagnóstico. Se definen las herramientas a utilizar. Se identifica la información básica comunitaria mediante entrevistas semiestructuradas y mapas comunitarios. Se identifican las limitaciones y potencialidades de los principales sistemas de producción. Se formulan las hipótesis del trabajo. Se consultan a expertos campesinos y técnicos.

Diseño y evaluación. Se implementan cursos de capacitación a técnicos campesinos sobre las tecnologías agroforestales obtenidas. Se evalúan los recursos agroforestales comunitarios como por ejemplo las especies con potencial agroforestal.

Planeación. En esta etapa se realiza el diseño de investigación y planeación del proyecto para responder a la pregunta ¿qué hacer para desarrollar y diseminar el sistema mejorado?

Gestión. Se buscan acuerdos para la implementación de las tecnologías agroforestales. Se analizan estrategias para la búsqueda de financiamiento e implementación de las tecnologías agroforestales.

Ordenamiento territorial

El ordenamiento territorial (OT) es un instrumento de planeación que determina el uso del suelo a corto, mediano y largo plazo. Tiene como objetivo general orientar las actividades productivas en las áreas forestales, encausar el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales e impulsar las actividades de conservación y protección hacia el desarrollo sustentable de las localidades. El OT sigue los mismos principios y fases

metodológicas de la mayoría de los estudios de planeación, los cuales están encaminados a comprender los elementos, procesos y mecanismos que intervienen en la estructura y la dinámica del uso del suelo y de los recursos naturales (CONAFOR, 2007; Pineda y Franco, 2008).

Este instrumento de política ambiental está conformado por seis etapas: caracterización, diagnóstico, prospección, proposición, instrumentación y gestión. A continuación se describen las principales características de estas fases con base en lo establecido por Arriaga y Córdova (2006) y Monterroso *et al.* (2008).

Por medio de un inventario de recursos, la fase de caracterización da respuesta a las preguntas: ¿qué se tiene?, ¿cuánto se tiene? y ¿dónde está?, lo que permite identificar, por un lado, la disponibilidad de los recursos en el territorio y, por el otro, sus formas de uso y manejo. También se determina la demanda o presión que ejercen las actividades humanas sobre los recursos. Durante esta etapa se caracterizan las variables que permitirán el análisis de la problemática a lo largo de la fase de diagnóstico.

El objetivo central del diagnóstico es evaluar la situación de los recursos naturales, de la población y de las actividades productivas que ésta realiza, responde a la pregunta: ¿cómo está? y averigua las posibles causas, con lo cual se determina la estabilidad o inestabilidad de un área específica; es decir, la factibilidad de un desarrollo sustentable o el equilibrio entre el estado natural y la presión social y productiva.

En esta fase se establece la calidad ecológica de los recursos y será evaluada a partir del deterioro de los recursos naturales, que se deriva, a la vez de la acción del ser humano. Interviene también la identificación de las formas de apropiación de los recursos naturales como consecuencia de las actividades productivas, para detectar prácticas que impliquen un uso inadecuado de tales recursos. La tipificación de cada una de las actividades productivas permite definir y caracterizar los sistemas de producción a partir de variables relacionadas con la superficie que ocupan, el grado de tecnicidad, los insumos utilizados y la infraestructura existente. Asimismo, se contemplan la distribución y dinámica de la población espacial y temporal, los aspectos

socioeconómicos, la especialización económica y la calidad de vida de las poblaciones que se condensan como una presión sobre el medio en general.

La relación entre estos elementos constituye la base para la propuesta de acciones y programas que permitan planear el uso de los recursos y revertir procesos de deterioro en el territorio.

La fase prospectiva plantea el diseño y la aplicación de mecanismos que permitan vincular los escenarios sobre el futuro, traduciéndolos en imágenes territoriales sobre el posible estado futuro de la calidad del ambiente, la presión sobre el mismo y el grado de estabilidad ambiental resultante.

La prospección se realiza a partir de la información sobre el escenario actual, identificando las etapas de la historia económica regional, la integración territorial con su dinámica de población y los puntos críticos desde el punto de vista del deterioro de los recursos naturales. El desarrollo de esta fase permite analizar las tendencias de los procesos generales de cambio, sobre la base de escenarios tendenciales, referido a la situación futura del área de acuerdo con las tendencias actuales y en escenarios estratégicos correspondiente a la situación del área de acuerdo con un plan integral de manejo.

De esta manera, la prospección del territorio a partir del desarrollo de escenarios alternativos permite identificar las regiones donde es necesario incidir para abatir la problemática ambiental. Esta etapa tiene un carácter sintético ya que ofrece una visión integral de la problemática, al considerar los factores naturales, productivos y socioeconómicos, correctivo debido a que es la base para planear y revertir tendencias presentes y preventivas al permitir proponer formas de aprovechamiento que eviten el deterioro de los recursos.

La fase de proposición se constituye en la etapa medular del proyecto, ya que determina la estrategia general del ordenamiento territorial, a través del modelo de uso de la tierra del área en cuestión, en el cual se identifican áreas con características comunes denominadas Unidades de Gestión Territorial (UGT) y la política ambiental de cada una de ellas. Dichas políticas pueden ser (Monterroso *et al.*, 2009):

Aprovechamiento. Política ambiental que promueve la permanencia del uso actual del suelo y/o permite su cambio en la totalidad de la UGT donde se aplica. En esta política siempre se trata de mantener por un periodo indefinido la función y las capacidades de carga de los ecosistemas que contiene la Unidad.

Restauración. Política que promueve la aplicación de programas y actividades encaminadas a recuperar o minimizar, con o sin cambios en el uso del suelo, las afectaciones producidas por procesos de degradación en los ecosistemas incluidos dentro de la UGT. En esta política se tratan de restablecer las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales en la UGT, para posteriormente asignarla a otra política ambiental.

Conservación. Política ambiental que promueve la permanencia de ecosistemas nativos y su utilización, sin que esto último implique cambios masivos en el uso del suelo en la UGT donde se aplique. Con esta política se trata de mantener la forma y función de los ecosistemas, a la vez que se utilizan los recursos existentes ahí.

Protección. Política ambiental que promueve la permanencia de ecosistemas nativos que por sus atributos de biodiversidad, extensión o particularidad merezcan ser incluidos en sistemas de áreas naturales protegidas en el ámbito federal, estatal o municipal. La utilización de los recursos naturales está sujeta a la normativa estipulada en el programa de manejo definido por la administración del área protegida.

Cada una de las UGT con su política ambiental se acompaña de sus respectivos usos de suelo, sea actual, propuesto, alternativo, condicionado e incompatible, así como una serie de lineamientos o criterios ecológicos de carácter general para definir las actividades necesarias en la ejecución del modelo.

Fase de Instrumentación. El desarrollo de esta etapa incluye todo el procedimiento jurídico para llevar la propuesta de ordenamiento territorial al nivel de decreto o programa. El proceso se centrará en el uso y apropiación de este instrumento por parte de quienes toman las decisiones en los diferentes ámbitos del gobierno federal.

La fase de gestión comprende la vinculación del proyecto de ordenamiento con la población local y la coordinación y concertación con los sectores involucrados. A partir de reconocer la función social del territorio, donde las políticas y programas institucionales beneficien al conjunto de la sociedad, la gestión se encarga de concertar y validar, en el ámbito sectorial, el estilo de desarrollo que cumpla con las aspiraciones sociales del país. Cabe aclarar que la gestión es un proceso que está presente no sólo en la etapa de elaboración del estudio; sino que comprende incluso más allá de la instrumentación del ordenamiento.

Servicios ambientales

Los servicios ambientales o ecosistémicos son los beneficios intangibles que los diferentes ecosistemas ponen a disposición de la sociedad, ya sea de manera natural o por medio de su manejo sustentable. En consecuencia, la base de los servicios ambientales se halla en los componentes y procesos que integran los ecosistemas. Entre los principales servicios ambientales destacan: la regulación del clima y el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales, la provisión de agua en calidad y cantidad suficientes, la generación de oxígeno, el control de la erosión, la captura de carbono y la asimilación de diversos contaminantes, la protección de la biodiversidad, entre otros (SEMARNAT, 2003).

Durante las dos últimas décadas del siglo XX surgieron críticas realizadas desde una perspectiva ambientalista respecto del ingreso nacional per cápita como medida de desempeño económico. Esas críticas establecen que el ingreso nacional per cápita: (1) no tiene en cuenta el agotamiento de los recursos naturales, (2) no tiene en cuenta la degradación ambiental que afecta a los servicios ambientales de apoyo vital ni a los de esparcimiento; y (3) no incluye gastos defensivos para rectificar o prevenir la degradación ambiental (Common y Stagl, 2008). Es por esta razón que se ha iniciado un proceso para introducir a los servicios ambientales dentro de las cuentas nacionales, así como establecer mecanismos y metodologías para cuantificar monetariamente su valor.

Con el fin de ayudar a los administradores de recursos naturales a evaluar las ventajas comparativas de los usos competitivos de los ecosistemas, los economistas han elaborado un conjunto de métodos para estimar el valor de los servicios ambientales en términos monetarios. Dado que en la mayor parte del mundo no se comercializan los servicios ambientales en general, no es posible medir su valor directamente mediante los procesos de mercado; por lo tanto, el esfuerzo para estimar su importancia económica muchas veces requiere de métodos indirectos. Estos métodos se pueden agrupar en dos categorías: (1) los que obtienen las estimaciones del valor a partir de la conducta de los consumidores en el mercado y (2) los métodos que dependen de las respuestas de los consumidores a preguntas directas. En el primer grupo se encuentran los métodos de costo-viaje, precios hedónicos y bienes sustitutos. Dentro del segundo grupo se encuentran los métodos de valoración contingente y los experimentos de preferencia (Bishop y Landell, 2007).

Una de las estrategias que le otorga valor monetario a los servicios ecosistémicos es el pago de servicios ambientales (PSA), la cual se vislumbra como una herramienta para prevenir la degradación de los ecosistemas y mejorar el bienestar humano. El PSA plantea que los propietarios de las tierras sean retribuidos por los servicios que éstas generan conciliando así sus intereses e incentivos con los de la sociedad que beneficia. Actualmente se están implementando a nivel internacional diversos esquemas de PSA, los cuales difieren en cuanto a la definición y clasificación de los servicios ambientales (Fregoso, 2006). En México, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) es quien ha establecido la legislación y los métodos de selección de las áreas sujetas a pago por servicios ambientales. Hoy en día se tienen registrados tres sistemas de PSA en el país a través del programa ProÁrbol: servicios ambientales hidrológicos, conservación de la biodiversidad, sistemas agroforestales con cultivos bajo sombra y secuestro de carbono (SEMARNAT, 2003).

Captura de carbono

La captura de carbono es un servicio ambiental que proporcionan bosques y selvas. Su relevancia es de primer orden ya que se relaciona directamente con la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera que generan el calentamiento atmosférico y

el fenómeno del cambio climático (SEMARNAT, 2003). Como estrategia de mitigación de gases de invernadero el proceso de secuestro de carbono es más barato en comparación a otros métodos para reducir el calentamiento global, además, tiene el potencial de agregar un valor significativo a las empresas forestales. Los beneficios económicos del almacenaje de carbono generalmente se definen en términos de costos y daños evitados (Bishop y Landell, 2007).

El servicio ambiental de captura de carbono se basa en el principio de que los componentes suelo, biomasa y agua, son reservorios de CO₂ que se pueden incrementar si se planifica adecuadamente su aprovechamiento. Sin embargo, actualmente se carece de estudios suficientes para conocer con veracidad el contenido actual de carbono (línea base) en cada componente. Esta línea base es fundamental para poder simular a futuro la dinámica del carbono bajo diferentes escenarios de aprovechamiento de los recursos naturales (Etchevers y Tinoco, 2010).

México es el país latinoamericano que va a la vanguardia en la investigación orientada a comprender la dinámica del carbono en los ecosistemas. En el año 2009 se realizó en Ensenada, Baja California el Primer Simposio Mexicano del Carbono en donde se dieron a conocer los avances y resultados de investigaciones relacionadas con este tema a nivel nacional e internacional. En este evento de Jong y colaboradores, presentaron el mapa nacional de producción de biomasa en los ecosistemas de México, en donde se observa que las zonas con mayor producción de materia seca ($> 195 \text{ MgMS ha}^{-1}$) son las selvas del sur de la Península de Yucatán, las partes altas de la Sierra Madre del Sur y de la Sierra de Chiapas, así como algunas áreas de la Sierra Volcánica Transversal en el centro del país.

Rojo *et al.* (2005) realizaron una investigación en la región hulera del Papaloapan en el estado de Oaxaca, para obtener ecuaciones que estimaran la biomasa total aérea del clon IAN-710 de *Hevea brasiliensis* con base en el diámetro normal. La distribución resultante de la biomasa en los componentes analizados del hule establece que el fuste concentra más del 80% de la biomasa total del árbol, y por el contrario las ramas delgadas son las que menos aportan biomasa en los individuos de diámetro normal menor a 10 centímetros ($< 2.8\%$). En ramas con diámetro mayor a 35 cm Rojo *et al.*

(2005) encontraron que las hojas son las que aportan menor cantidad de biomasa (> 2.8 %) . Ordoñez *et al.* 2008, estimaron el contenido de carbono en la vegetación, hojarasca y el suelo bajo 10 diferentes usos de la tierra y tipos de vegetación en la región Purépecha de Michoacán. Para el desarrollo del estudio seleccionaron 92 sitios de muestreo con base en la accesibilidad física y social (permiso de las comunidades asentadas en el área) y un área mínima de 4 hectáreas por fragmento de uso de suelo. Para el caso del análisis de la vegetación 53 sitios corresponden a bosques (pino, pino-encino, encino, abeto, plantaciones) y 30 sitios en agricultura, pastizales, matorrales, huertos de aguacate y áreas sin vegetación. Los resultados que obtuvieron mostraron diferencias del contenido de carbono entre los diferentes usos de la tierra y tipos de vegetación. Los matorrales presentaron los menores contenidos de C ($28.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$), posteriormente se encuentran las plantaciones de árboles y las huertas de aguacate con $50.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y $53.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ respectivamente, y los restantes tipos de bosque registraron las mayores cantidades de carbono con valores entre $91.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (bosque de pino-encino) hasta $134.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (bosque de abeto).

En la selva Lacandona de Chiapas, de Jong *et al.*(2000) estimaron el cambio de los reservorios de carbono en diferentes periodos, para ello compararon los mapas de uso de la tierra y la cobertura vegetal (UT/CV) de la década de los 70s contra los mapas de los años 1996-1997 obtenidos a través de la clasificación de imágenes de satélite Landsat TM, a cada uno de los UT/CV en ambas cartografías, se le asignaron valores de contenido de carbono, obteniendo así los flujos netos entre ecosistemas terrestres. Como resultado se observó que durante los 20 años analizados, el área total de bosque maduro se redujo en cerca del 31%, los bosques secundarios y los matorrales secundarios se incrementaron en 922% y 568% respectivamente, por su parte la agricultura y los pastizales también se incrementaron pero solo en un 21% y 92% respectivamente. González (2008) estimó la biomasa y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi*, *Pinus oocarpa* y *Quercu ssp.* en el norte de Chiapas. Como resultado el autor encontró que *P. oocarpa* es la especie que contiene mayor cantidad de biomasa total con 473.2 toneladas de materia seca por cada $1,000 \text{ m}^2$.

En lo que se refiere al componente suelo, Balbontín *et al.* (2009) cuantificaron el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) a nivel nacional. Los investigadores encontraron que las zonas con mayor COS (300-1600 MgC ha⁻¹) se ubican en la Sierra Norte de Oaxaca, la Sierra Norte de Puebla, el sureste del estado de México y algunas partes de Chiapas y la Península de Yucatán. Por el contrario, gran parte de la Península de Baja California reporta los valores más bajos de carbono (0.1-25 MgC ha⁻¹). De forma similar, Etchevers *et al.* (2010) estimaron el contenido de COS de las áreas agrícolas de México en donde encontraron que en zonas de los estados de México, Yucatán, Michoacán, Veracruz y Chiapas se registra la mayor cantidad de COS con valores que oscilan entre 300 MgC ha⁻¹ y 1,466 MgC ha⁻¹. En esta misma investigación se reporta que los Histosoles son los suelos que registran la mayor cantidad de COS con 763.4 MgC ha⁻¹.

Otra investigación que cuantifica el contenido de carbono orgánico en el suelo a nivel nacional es la de Segura *et al.* (2005). Los autores recolectaron 4,583 muestras georeferenciadas de suelo a una profundidad de 20 cm en todo el país, las cuales fueron analizadas en laboratorio para obtener su contenido de carbono orgánico. Posteriormente con la ayuda de los programas computacionales IDRISI y ArcView 8.1, se realizó una interpolación de los sitios de muestreo con su respectivo contenido de carbono orgánico para así obtener la cartografía correspondiente. Como resultado se obtuvo que los estados de Yucatán, Quintana Roo, Querétaro, Chiapas e Hidalgo, registran la mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo con más de 80 MgC ha⁻¹, en contraparte, Baja California Sur, Baja California, Sonora, Coahuila y Tlaxcala son las entidades que registran la menor cantidad de COS con menos de 30 MgC ha⁻¹.

Recarga de agua

La unidad física básica en la regulación del agua es la cuenca. Muchos de los patrones hídricos observados en una cuenca, al igual que la cantidad y calidad del agua que de ella emana, dependen de su relieve y pendiente, así como de su tamaño, ubicación geográfica, tipo de suelo y por supuesto del conjunto de los ecosistemas que la conforman. El papel de los bosques y selvas en la captación de agua es de primer orden ya que los múltiples estratos de vegetación interceptan el agua de lluvia de manera muy

eficiente y la canalizan lentamente por hojas, ramas y troncos hacia el suelo, de manera que regulan el escurrimiento pluvial y evitan que el suelo se sature. A su vez, la densa hojarasca y suelos con un alto porcentaje de porosidad y materia orgánica característicos de estos ecosistemas actúan como esponjas para el agua de lluvia, permitiendo su lenta filtración hacia el subsuelo, la captación de agua adicional mediante la condensación de la neblina y un aumento en la recarga de los mantos acuíferos (SEMARNAT, 2003; Maderey y Jiménez, 2005).

La mayoría de las actividades humanas alteran la composición y estructura de los ecosistemas, y por lo consiguiente los procesos que generan servicios ambientales hidrológicos. Como ejemplo se tiene a la actividad agrícola, la cual introduce contaminantes originados por la aplicación de fertilizantes en los cauces de agua, la industria y las áreas urbanas hacen lo correspondiente mediante la deposición de desechos en los cuerpos de agua (Ongley, 1997; Brauman *et al.*, 2007). Sin embargo, el cambio de uso de la tierra es el factor que más demerita la calidad y cantidad de los servicios hidrológicos a través de la infiltración y el escurrimiento.

Una de las ideas sobre la cual se basa el programa de pago por servicios ambientales hidrológicos en México es que la conservación de bosques y selvas favorece los procesos de filtrado, retención y almacenaje de agua, lo que incrementa la oferta de bienes y servicios relacionados. Al respecto, existe un acuerdo en que estos procesos dependen de factores que varían espacial y temporalmente como: la pendiente del sitio, las características del suelo, la composición y estructura de las comunidades vegetales, las variables climáticas, los regímenes de manejo, entre otros (Pérez *et al.*, 2006). Debido al elevado costo monetario y la cantidad de trabajo que se requiere para la obtención de las variables hidrológicas directamente en campo, usualmente se utilizan modelos para simular su comportamiento.

Actualmente existe una gran diversidad de estos modelos, los cuales son usualmente catalogados con base en la cantidad de insumos necesarios. Dentro de los más sencillos se encuentra el método racional que se aplica para estimar el volumen escurrido mediante la ecuación $V=C_e*P_p*A$, en donde V es el volumen medio que puede escurrir, C_e es el coeficiente de escurrimiento, P_p es la precipitación media anual y A es el área

de la cuenca (Lucio, 2006). En contraparte existen otros modelos como el de Thornthwaite modificado versión III en donde se necesitan datos de temperatura media mensual, precipitación media mensual, capacidad de almacenaje de agua en el suelo y la latitud del sitio. Este modelo realiza un balance mensual de humedad en el suelo y como resultado reporta variables como la evapotranspiración potencial y actual, el déficit de humedad en el suelo, el almacenaje de humedad en el suelo, el escurrimiento, entre otras (Estrada Berg *et al.*, 2008).

Como ejemplo de la aplicación de los modelos para zonificar y cuantificar el servicio ambiental hidrológico se encuentra el estudio de Dionicio y Ramírez (2008), quienes evaluaron el comportamiento hidrográfico en microcuencas del noreste de Hidalgo donde se desarrolla el bosque mesófilo de montaña. Para la realización de la investigación se utilizó el balance hídrico evaluado con la siguiente expresión $P_t - (Int + ETP + Esc) = \Delta S$, donde P_t es la precipitación total, Int es la interceptación, ETP es la evapotranspiración potencial, Esc es el escurrimiento y ΔS es el cambio en el almacenamiento de agua en el sistema. Derivado de la ecuación anterior los autores evaluaron el volumen de infiltración de la siguiente manera $Infiltración = P_t - (Int + ETP + Esc)$. Como resultado encontraron que la precipitación total en el área de estudio es de 5,161.5 millones de m³ de los cuales el 12 % se infiltra abasteciendo al acuífero Atlapexco-Candelaria.

Monterroso *et al.* (2009), evaluaron los servicios ambientales hidrológicos del parque nacional El Chico, estado de Hidalgo. El modelo utilizado en este estudio fue el de Thornthwaite modificado versión III (Estrada Berg *et al.*, 2008). Como resultado encontraron que la precipitación promedio anual en el parque es de 881.1 mm, de los cuales 132.1 mm son interceptados por la vegetación, 432.2 mm se evapotranspiran, 264.6 mm se escurren y 52.2 mm se infiltran. Los autores concluyen que los servicios ambientales hidrológicos que se generan en el parque son de gran importancia ya que alimentan al acuífero del cual se abastecen importantes zonas urbanas como por ejemplo Pachuca, la capital del Estado.

Cambio climático

El clima se define como las condiciones promedio del tiempo atmosférico en un periodo de tiempo (generalmente 30 años), a su vez, el cambio climático se conceptualiza como la modificación en el comportamiento promedio del clima durante un periodo largo de tiempo (Parry *et al.*, 2007). De manera natural han ocurrido cambios en el clima durante la historia de la Tierra, originados por la tectónica de placas, erupciones volcánicas, tormentas solares, cambios en la excentricidad del planeta o por el impacto de meteoritos (Briggs, 1996). Es importante diferenciar entre los conceptos cambio climático y variabilidad climática ya que erróneamente se usan como sinónimos a menudo. La variabilidad climática se refiere a las variaciones con relación al estado medio del clima en las escalas temporal y espacial, ejemplos de la variabilidad climática incluyen la presencia de sequías e inundaciones, el fenómeno del ENSO, la incidencia de frentes fríos, entre otros (Agrawala, 2005).

Gases de efecto invernadero

Actualmente se está iniciando un nuevo periodo de cambio climático, aunque a diferencia de los registrados en épocas pasadas, se presenta por efecto de las actividades del humano (Rivera, 1999). Este cambio climático antropogénico se origina por la creciente concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆) en la atmósfera, lo que provoca el incremento de la temperatura mundial. Los GEI producen el efecto invernadero en la atmósfera ya que dejan pasar la radiación solar de onda corta proveniente del espacio, pero al ser reflejada por la superficie terrestre se convierte en radiación de onda larga (infrarroja) y los GEI de la atmósfera absorben parte de esta radiación calentándola. Este efecto invernadero es de suma importancia para el desarrollo de la vida en el planeta, ya que sin la presencia de éste la temperatura promedio del planeta sería de -15 °C aproximadamente.

Sin embargo, una elevada y abrupta concentración de GEI representa un calentamiento global. El proceso de contaminación atmosférica mundial ha hecho que las concentraciones de CO₂ pasen de 280 ppm antes de la revolución industrial, a más de 380 ppm en la actualidad, o bien a 430 ppm si se considera a todos los GEI en términos de su equivalencia en dióxido de carbono lo que representa la más alta concentración

registrada durante los últimos 650 mil años. Las principales actividades que liberan GEI a la atmósfera son la quema de combustibles fósiles y de biomasa, incendios forestales, el cultivo de arroz, la producción pecuaria, residuos sólidos urbanos, uso de fertilizantes, refrigerantes industriales, aparatos de aire acondicionado, la actividad petroquímica, entre otros (CICC, 2007; Solomon *et al.*, 2007).

Para el caso de México, el último inventario de gases de efecto invernadero (INEGEI) (INE, 2009) reporta las emisiones por fuentes y sumideros para el periodo 1990-2006, realizado conforme a los lineamientos establecidos por la Convención Marco de las Naciones Unidas frente al Cambio Climático. El INEGEI registra un total de emisiones de 711,650.2 Gg para 2006 en unidades de CO₂ equivalente, lo que representa un incremento del 40.3 % respecto al año 1990. El sector energía es quien libera la mayor cantidad de CO₂ hacia la atmósfera, especialmente el subsector generación de energía el cual emite el 20.9 % de las emisiones totales de este gas. Por su parte el sector uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (USCUSS) emite el 9.9 % del total de CO₂, en este grupo se incluyen las tierras agrícolas, las praderas y las tierras forestales. Con respecto a las emisiones de metano, la disposición de residuos es quien aporta la mayor cantidad de emisiones con el 14.4 % del total nacional, dentro de esta actividad se consideran los rellenos sanitarios, las aguas residuales y la incineración de desechos. (INE, 2009).

Impactos

Para poder estimar los posibles impactos del cambio climático en los diversos ecosistemas y sectores de la actividad humana, se han desarrollado modelos generales de circulación atmosférica (GCM por sus siglas en inglés). Los GCM simulan el comportamiento de las variables climáticas con base en las nuevas concentraciones de GEI, a nivel mundial se han desarrollado diversos GCM los cuales se actualizan periódicamente. Algunos ejemplos de GCM son el HADLEY, creado por el Hadley Center del Reino Unido; el GFDL, desarrollado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory de los Estados Unidos de América; el ECHAM, creado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; entre otros. Los GCM se han desarrollado bajo cuatro diferentes familias de escenarios socioeconómicos (A1, A2, B1, B2). La

familia A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B). El escenario B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1 pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información. El escenario B2 describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Y por último el escenario A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento (Nakicenovic y Swart, 2000; Metz *et al.*, 2007).

Las salidas de los GCM estiman un calentamiento mundial promedio para el año 2100 de 0.3 °C a 6.4 °C, dependiendo el escenario evaluado. Este incremento en la temperatura conllevará a modificaciones globales en los patrones de distribución e intensidad de otras variables climáticas, que en su conjunto provocarán cambios en calidad y abastecimiento sobre los recursos naturales y las funciones de los ecosistemas (IPCC, 2007). Ejemplos a nivel mundial de los impactos del cambio climático se han agrupado en cinco categorías generales:

Agua. Mayor disponibilidad de agua en los trópicos húmedos y en latitudes altas. Menor disponibilidad de agua y aumento de las sequías en latitudes medias y latitudes bajas semiáridas. Centenares de millones de personas expuestas a un mayor estrés hídrico.

Ecosistemas. Aumento del desplazamiento geográfico de especies y el riesgo de incendios incontrolados. Número apreciable de extinciones en todo el mundo. Cambios en los ecosistemas debido al debilitamiento de la circulación de renuevo meridional.

Alimentos. Impactos negativos complejos y localizados sobre pequeños propietarios, agricultores y pescadores de subsistencia. Tendencia descendente de la productividad cerealera en latitudes bajas.

Costas. Aumento de daños de crecidas y tempestades. Pérdida de un 30 % de humedales costeros. Millones de personas podrían padecer inundaciones costeras cada año.

Salud. Aumento de la carga de malnutrición y de enfermedades diarreicas, cardiorrespiratorias e infecciosas. Mayor mortalidad por olas de calor, crecidas y sequías. Cambio en la distribución de algunos vectores de enfermedades. Carga sustancial para los servicios de salud.

Las simulaciones de los incrementos en temperatura para México se han clasificado en tres periodos climatológicos (2020, 2050 y 2080) para el escenario socioeconómico A2. Para la climatología de los 2020s, el cambio en temperatura media en el país puede variar de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la parte sur, a $1.3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la zona noroeste. Para la climatología de los 2050s, se proyecta un aumento de entre $1.3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sur y $2.3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el norte. Para la climatología de los 2080s, el aumento de temperatura se ubica entre $2.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sur y $3.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el norte del país. Con respecto a la precipitación acumulada anual, las salidas de los modelos establecen lo siguiente. Para la climatología de los 2020s, se proyectan decrementos de lluvia del orden de 5 % en el centro-norte y sur-sureste del país; y entre -5 % y -10 % para el centro y noroeste. Es en esta última región donde se espera disminución de hasta 30 % hacia finales de siglo. Por otra parte existe una región en el norte que presentaría incrementos de 5 %. Para la climatología de los 2050s, se esperan decrementos promedio de precipitación del orden de 5 % en el centro-norte y sur-sureste del país; entre 5 % y 10 % para el centro, noroeste y en la Península de Yucatán. Para la climatología de los 2080s, la precipitación muestra un patrón similar al de las dos climatologías anteriores, pero intensificado (INE, 2009).

En el análisis de los posibles impactos del incremento del nivel del mar se ubicaron a los Estados de la República que presentaran mayores afectaciones si el nivel del mar se elevara 1 m. Los estados que se identificaron con mayor superficie afectada por el incremento del mar son Campeche (7.5 %), Nayarit (3.2 %), Quintana Roo (9.5 %), Sinaloa (6.6 %), Tabasco (8.2 %), Tamaulipas (2.0 %), Veracruz (5.0 %) y Yucatán (4.7 %). Para el caso de la cantidad y calidad del agua, se estima que las regiones hidrológicas administrativas del norte serán las más vulnerables, por el contrario las

zonas del sur presentan los menores impactos (INE, 2009). En el sector agrícola se podrían presentar los siguientes efectos directos: Cambios en el desarrollo y productividad de los cultivos, por afectaciones en los ciclos fenológicos. Incremento en el periodo libre de heladas de las zonas agrícolas, que se traduciría en un mayor periodo útil para el desarrollo de algunos cultivos y aumento en el número de ciclos agrícolas por año. Reducción de la superficie cultivable y en los rendimientos generados en zonas de temporal, debido al aumento en la duración e intensidad de la sequía. Afectaciones en los distritos de riego del noroeste del país, en cuanto a la disponibilidad de agua (Monterroso *et al.*, 2010a).

En el sector forestal de México, las especies de interés productivo de zonas templadas tienden a disminuir sus áreas de distribución potencial al aplicar modelos de cambio climático para el periodo de tiempo 2050 debido al aumento en la temperatura, especialmente las especies *Pinus cembroides* y *Pinus pseudostrobus*. Para las especies de zonas semiáridas se reduciría la superficie con aptitud natural para *Acacia farnesiana*, las zonas del noreste del país y la Península de Baja California presentarían los mayores incrementos en la superficie no apta para la distribución potencial de las especies, por el contrario, en la región sur del altiplano mexicano aumentaría la aptitud. La situación de las especies de zona tropical tiende a polarizarse, ya que algunas especies registran incrementos en su distribución como es el caso de *Swietenia macrophylla*, *Tectona grandis* y *Brosimum alicastrum*; en otras como *Cedrela odorata* se presenta un incremento en la zona de distribución no apta. (Gómez *et al.*, 2010). Para identificar los impactos del cambio climático sobre el sector ganadero, se cuantificaron los cambios en comparación con la línea base de los coeficientes de agostadero (CA) a nivel nacional, como resultado se encontró que los estados de Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Colima, Jalisco, Nuevo León, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán; podrían ser los sitios en donde se resentirá con mayor fuerza los cambios de CA, situación que afectará a la producción ganadera del país (Monterroso *et al.*, 2010b)

Otros estudios se han realizado en zonas más específicas de México en donde se evalúa el impacto del cambio climático sobre los recursos naturales o actividades económicas,

algunos ejemplos son los de Conde *et al.* (2004), Gómez *et al.* (2007), Tinoco *et al.* (2009), Monterroso *et al.* (2009) y Terrazas *et al.* (2010).

Mitigación

Desde la década de 1990 se han propuesto y desarrollado diversas estrategias y acciones para disminuirlo o mitigar el cambio climático, así como para sobrellevarlo o adaptarse a los cambios venideros. Conceptualmente se entiende a la mitigación como “*la intervención antropogénica para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero*” (Torres *et al.*, 2008). El documento internacional de mayor importancia que estipula los lineamientos para la mitigación del cambio climático es el Protocolo de Kyoto. En este documento se establece por cada país enlistado en el Anexo B, el porcentaje de reducción de emisiones de GEI enlistados en el Anexo A; esta reducción se deberá llevar a cabo en el periodo de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012 (CMNUCC, 1998). Si bien algunos países han realizado esfuerzos para disminuir sus emisiones de GEI, algunos otros han decidido desconocer el Protocolo y no firmar los compromisos acordados. Aun así el IPCC reporta que los estudios realizados, tanto desde una perspectiva ascendente como descendente, indican que hay un alto nivel de coincidencia y abundante evidencia de que existe un potencial económico sustancial de mitigación de las emisiones mundiales de GEI en los próximos decenios, que podría contrarrestar el crecimiento proyectado de las emisiones mundiales o reducir estas por debajo de los niveles actuales (IPCC, 2007).

Un punto importante a considerar en el desarrollo de las estrategias de mitigación es la persistencia de los GEI. Suponiendo que el día de hoy se eliminaran todas las fuentes de emisión de GEI en el planeta, se continuaría el proceso de cambio climático, debido a la vida media de los GEI en la atmósfera. El dióxido de carbono tiene una vida media de 50 a 200 años, el metano de 12 a 15 años, el óxido nitroso de 120 años, los hidrofluorocarbonos de 1.5 a 264 años; y los más persistentes, los perfluorocarbonos, de 2,600 a 50,000 años (CICC, 2007). Es por esta razón que a la par de las estrategias de mitigación se deben de desarrollar estrategias de adaptación.

A continuación se presentan algunas estrategias de mitigación en siete sectores propuestas por el IPCC (2007):

Suministro de energía. Mejora del suministro y de la eficacia de distribución. Sustitución de carbono por gas como combustible. Energía nuclear. Energías renovables (solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica y bioenergía). Utilización combinada de calor y energía combinada.

Transporte. Vehículos de mayor aprovechamiento de combustible. Vehículos híbridos. Vehículos diesel más limpios. Biocombustibles. Sustitución del transporte diario por los sistemas de transporte ferroviario y públicos. Transporte no motorizado. Vehículos eléctricos.

Edificios. Iluminación eficiente y aprovechamiento de la luz de día. Aparatos eléctricos y dispositivos de calefacción más eficaces. Mejora de los quemadores de las cocinas. Diseño solar pasivo y activo para calefacción y refrigeración. Fluidos de refrigeración alternativos. Recuperación y reciclado de los gases fluorados.

Industria. Uso final más eficiente de los equipos electrónicos. Recuperación de calor y de energía. Reciclado y sustitución de materiales. Control de emisiones de gases distintos del CO₂.

Agricultura. Mejora de la gestión de las tierras de cultivo y de pastoreo para incrementar el almacenamiento de carbono en el suelo. Agroforestería. Restauración de suelos turbosos cultivados y de tierras degradadas. Mejora de las técnicas de cultivo del arroz. Gestión del ganado y del estiércol para reducir las emisiones de CH₄. Mejora de las técnicas de aplicación de fertilizantes nitrogenados. Cultivos especializados para la sustitución de los combustibles fósiles. Mejora de la eficiencia energética.

Silvicultura/bosques. Forestación. Reforestación. Agroforestería. Gestión de bosques. Reducción de la deforestación. Gestión de productos de madera cultivados. Utilización de productos forestales para la obtención de biocombustibles. Mejora de las especies de árboles para aumentar la productividad de la biomasa y el secuestro de carbono. Mejora de las tecnologías de teledetección para el análisis del potencial de secuestro de carbono en la vegetación y en el suelo.

Desechos. Recuperación de CH₄ en rellenos sanitarios y vertederos. Incineración de desechos con recuperación de energía. Composteo de desechos orgánicos. Tratamiento controlado de las aguas de desecho. Reciclado y minimización de desechos. Biocubiertas y biofiltros para optimizar la oxidación del CH₄.

Aunque México no se encuentra dentro del Anexo B del Protocolo de Kyoto y por ende no está comprometido a reducir sus emisiones de GEI, presenta un avance considerable en cuanto a conocimiento y creación de proyectos y políticas relacionados al cambio climático.

En relación a las estrategias de mitigación, se han realizado estimaciones nacionales que cuantifican la reducción de emisiones de GEI (INE, 2009). En materia de energías renovables se podrían reducir entre 80 MtCO₂e y 115 MtCO₂e en el año 2030, por su parte, mediante los procesos de eficiencia energética se podrían mitigar 200 MtCO₂e. En los sectores residencial, comercial y público, se podrían desarrollar acciones para la sustitución de las lámparas incandescentes por lámparas fluorescentes compactas u otras de mayor eficiencia, lo que mitigaría más de 10 MtCO₂e para 2030. En el sector transporte se podría impulsar, en el mediano plazo, una mayor penetración de sistemas de autobuses rápidos con carriles confinados para cubrir al menos las 10 mayores ciudades del país, con un potencial de mitigación anual de hasta 3.6 MtCO₂e, además de beneficios económicos en salud y tiempos de viaje. Con la promoción y mayor aplicación de prácticas tales como la minimización y el reciclado de residuos, entre otras, se esperaría lograr una mitigación del orden de 83 MtCO₂e en 2030 (PEF, 2009).

Dentro de las estrategias de mitigación en el sector agrícola se encuentra la implementación de la agricultura de cero labranza, la cual puede mitigar 0.88 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹; la producción de biocombustibles dividida en producción de etanol de caña de azúcar, etanol de sorgo y biodiesel de la palma de aceite podría mitigar 11.2 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹, 1.6 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹ y 12 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹, respectivamente. En cuanto al sector forestal, algunas de las estrategias de mitigación propuestas son la reforestación y la restauración de bosques con una tasa de mitigación de 5 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹ y la forestación con 8.6 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹; además otras estrategias como el manejo forestal, la producción de carbón y la producción de electricidad con base en biomasa presentan tasas de

mitigación de 0.9 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹, 2.5 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹ y 3.1 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹, respectivamente(Johnson *et al.*, 2010).

Como estrategia de mitigación, la Agroforestería juega un papel importante ya que el núcleo de cualquier diseño agroforestal es el desarrollo de leñosas en el mismo espacio, y en ocasiones en el mismo tiempo, que cultivos y/o animales. Esta característica de la Agroforestería le permite incrementar el secuestro de carbono y almacenarlo en la parte aérea y subterránea de los agroecosistemas, a una tasa mayor en comparación del sistema de producción monocultivo. Kandji *et al.* (2006) establecieron intervalos aproximados del potencial de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de diferentes ecorregiones del mundo. La ecorregión tropical húmeda alta de Norteamérica bajo el sistema silvopastoril registra la mayor cantidad de carbono a razón de 133-154 MgC ha⁻¹, en contraparte, la ecorregión tropical húmeda baja del norte de Asia registra la menor tasa con 15-18 MgC ha⁻¹. Nair *et al.* (2009) estudiaron el secuestro de carbono en el suelo bajo diferentes sistemas agroforestales en cinco países, las unidades estudiadas fueron sistemas silvopastoriles en Estados Unidos, España Brasil, huertos caseros multiespecies en India, cultivos intercalados y barreras vivas en Malí, y cacao de sombra en Brasil. Como resultado encontraron que los sistemas que están basados en árboles almacenan significativamente mayor cantidad de carbono en horizontes del suelo profundos en comparación con los sistemas que carecen de árboles en su diseño; además, encontraron que el contenido de carbono en el suelo se incrementa conforme más cerca esté el sitio de muestra de árboles.

Adaptación

La adaptación al fenómeno del cambio climático se conceptualiza como “*el ajuste de los sistemas humanos o naturales frente al cambio climático, con la finalidad de reducir la vulnerabilidad de las poblaciones humanas, minimizar daños y aprovechar los posibles beneficios de las nuevas condiciones climáticas*” (Parry *et al.*, 2007), la capacidad adaptativa de los países está íntimamente relacionada con el desarrollo social y económico, aunque se haya desigualmente distribuida tanto entre las sociedades como en el interior de estas (Torres *et al.*, 2008). El interés y apoyo para el desarrollo e implementación de estrategias de adaptación es más reciente en comparación con las

estrategias de mitigación, un avance importante en el reconocimiento de la importancia de la adaptación al cambio climático se dio con la Declaración Delhi de la octava sesión (COP 8) de la conferencia de las partes del CMNUCC en 2002 (Kandji *et al.*, 2006). A partir de la COP 8 se han planteado diversas opciones de adaptación al cambio climático, aunque en su mayoría son muy generales y son pocos los países que las están ajustando e implementando dentro de sus sociedades. Algunos ejemplos de estrategias de adaptación por cada sector que establece el IPCC (2007) son las siguientes:

Agua. Potenciación de la recolección de agua de lluvia. Técnicas de almacenamiento y conservación de agua. Reutilización del agua. Desalación de agua marina. Eficiencia de uso del agua y de la irrigación.

Agricultura. Modificación de las fechas de siembra y plantación y de las variedades de cultivo. Reubicación de cultivos. Mejora de la gestión de las tierras. Implementación de sistemas agroforestales.

Infraestructura/asentamientos. Muros de contención marina y barreras contra mareas de tempestad. Reforzamiento de dunas. Adquisición de tierras y creación de humedales como retardadores del aumento del nivel del mar y de las inundaciones. Protección de las barreras naturales existentes.

Salud humana. Planes de actuación para hacer frente a los efectos del calor sobre la salud. Servicios médicos de emergencia. Mejora de las medidas de monitoreo y control de enfermedades sensibles al clima. Agua salubre. Mejora de los saneamientos.

Turismo. Diversificación de las atracciones e ingresos turísticos.

Transporte. Reordenación/reubicación. Normas de diseño y planificación de carreteras. Ferrocarriles y otras infraestructuras para hacer frente al calentamiento y a los fenómenos de drenado.

Energía. Consolidación de la infraestructura secundaria de transmisión y distribución. Cableado subterráneo para servicios públicos básicos. Eficiencia energética. Utilización de fuentes renovables. Menor dependencia de fuentes de energías únicas.

En México se han llevado a cabo esfuerzos importantes para desarrollar e implementar estrategias de adaptación. En el Programa Especial de Cambio Climático (PECC) se establece que las tareas de adaptación al cambio climático, centradas en la reducción de la vulnerabilidad del país frente al mismo, son de alta prioridad para el gobierno del país (PEF, 2009). En este mismo documento así como en la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENACC) (CICC, 2007) se plantean diversas opciones de adaptación en los diferentes sectores, algunas de ellas son:

Recursos hídricos. Mejorar la disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficientes. Fortalecer capacidades de adaptación ante fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos extremos. Reducir la vulnerabilidad de asentamientos humanos y de la infraestructura hidráulica ante fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos extremos, en coordinación con acciones de gestión integral de riesgo. Consolidar un sistema nacional de observación meteorológica e hidrológica. Profundizar el conocimiento sobre los impactos y la vulnerabilidad de los recursos hídricos ante la variabilidad y el cambio climático.

Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. Reducir la vulnerabilidad del sector agrícola y asegurar la agrobiodiversidad del país ante los efectos del cambio climático. Modernizar la infraestructura hidroagrícola y tecnificar las superficies agrícolas en coordinación con usuarios y autoridades locales. Profundizar el conocimiento sobre los impactos y la vulnerabilidad del sector agrícola ante la variabilidad y el cambio climático. Reducir la vulnerabilidad del sector pecuario y fortalecer capacidades de adaptación ante los efectos del cambio climático. Profundizar el conocimiento sobre los impactos y la vulnerabilidad del sector pecuario ante la variabilidad y el cambio climático. Aumentar la cobertura de conservación, ordenamiento y aprovechamiento forestal sostenible considerando los efectos del cambio climático. Profundizar el conocimiento sobre los impactos y la vulnerabilidad del sector forestal ante la variabilidad y el cambio climático. Fortalecer capacidades de adaptación del sector pesquero ante los efectos del cambio climático. Profundizar el conocimiento sobre los impactos y la vulnerabilidad del sector pesquero ante la variabilidad y el cambio climático.

Ecosistemas. Preservar, ampliar e interconectar los ecosistemas naturales prioritarios y su biodiversidad considerando las potenciales afectaciones relacionadas con el cambio climático. Profundizar el conocimiento sobre los impactos y la vulnerabilidad de los bosques, selvas, matorrales, pastizales y humedales interiores ante la variabilidad y el cambio climático.

Aguas continentales, costeras y marinas. Definir y mantener las capacidades de disminución de riesgos y amortiguamiento de impactos de los ecosistemas acuáticos continentales, costeros y marinos, ante los efectos del cambio climático. Preservar la integridad de las zonas marinas y costeras como medida de amortiguamiento ante impactos adversos y como depósitos y sumideros de CO₂.

Vida silvestre. Proteger y preservar la biodiversidad de especies nativas en riesgo ante los efectos del cambio climático. Profundizar el conocimiento sobre la vulnerabilidad de las especies indicadoras, clave e invasoras de interés especial ante los potenciales impactos del cambio climático.

Suelos. Reducir la degradación de suelos derivada de las actividades agropecuarias y forestales, mediante estrategias y prácticas sustentables de uso del suelo y obras de conservación. Profundizar el conocimiento sobre la vulnerabilidad de los suelos ante el cambio climático y sus impactos.

Energía, industria y servicios. Fortalecer capacidades de adaptación del sector energético ante los impactos del cambio climático. Profundizar los conocimientos sobre la vulnerabilidad del sector industrial ante los impactos adversos del cambio climático. Profundizar los conocimientos sobre la vulnerabilidad del sector turismo ante los impactos adversos de la variabilidad climática y del cambio climático. Profundizar los conocimientos y reducir la vulnerabilidad del transporte terrestre ante el cambio climático. Fortalecer capacidades de adaptación y reducir la vulnerabilidad de infraestructura portuaria ante la variabilidad del clima y el cambio climático. Profundizar los conocimientos sobre los impactos y la vulnerabilidad de la infraestructura aérea ante la variabilidad natural del clima y el cambio climático. Instrumentar programas de prevención con fines de adaptación al cambio climático en

los servicios de telecomunicaciones y su infraestructura. Construir o convertir edificios para mejorar su eficiencia energética y su equilibrio térmico. Fomentar el desarrollo de plantas de generación eléctrica con fuentes de energía renovables para reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Ordenamiento territorial y desarrollo urbano. Promover la incorporación de criterios preventivos de adaptación ante los efectos del cambio climático en las políticas y programas de desarrollo urbano y ordenamiento territorial, que atiendan en particular a los sectores más vulnerables de la población.

Salud pública. Fortalecer los sistemas de salud pública a través de alianzas estratégicas con sectores y regiones por medio de instrumentos de planeación, contando con una cultura de prevención e incorporando planes de atención a contingencias ambientales y epidemiológicas. Prevenir y controlar los efectos nocivos de episodios de riesgo sobre la salud de la población, asociados con cambios en el clima. Reforestar zonas urbanas para proveer sombra y amortiguar el incremento de la temperatura.

La agroforestería también es considerada como una estrategia de adaptación. La bondad de estos sistemas reside en la diversidad de especies que se cultivan en una determinada superficie, lo que conlleva a una mayor estabilidad en las condiciones del agroecosistema gracias a las relaciones interespecíficas que se desarrollan, algunos ejemplos de estas interacciones son la disminución de la evapotranspiración en los estratos medios y bajos derivada de la sombra de los árboles en el estrato superior, la protección contra plagas y enfermedades, las asociaciones micorrízicas, la fijación de nitrógeno, entre muchas otras (Nair, 1997; Krishnamurthy y Ávila, 1999). Otra característica de adaptación de la agroforestería es la resiliencia del sistema ante condiciones extremas de temperatura y precipitación, ya que al presentarse eventos fuera de lo común, es posible que alguna especie perezca, pero otras seguirán en pie para brindarle ingresos económicos al productor al final de la época de cosecha (Torres *et al.*, 2008).

Literatura citada

- Agrawala, S. (ed.). 2005. Bridge over troubled waters: linking climate change and development. Organization for Economic Cooperation and Development. Francia. 154 pp.
- Arriaga, V. y A. Córdoba. 2006. Manual para el proceso de ordenamiento ecológico. Instituto Nacional de Ecología. México. 360 pp.
- Balbontín, C., C.O. Cruz, F. Paz y Jorge Etchevers. 2009. Soil carbon sequestration in different ecoregions of Mexico. *En*: Lal, R. y R.F. Follet. Soil carbon sequestration and the greenhouse effect. SSSA Special Publication 57. U.S.A. p. 71-96
- Bishop, J. y N. Landell. 2007. Los servicios ambientales de los bosques. *En*: Pagiola, S, J. Bishop y N. Landell (coomp.). La venta de servicios ambientales forestales. Instituto Nacional de Ecología. México. p. 47-74.
- Brauman, K.A., G.C. Daily, T.K. Duarte y H.A. Mooney. 2007. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environmental and Resources* 32: 6.1-6.32
- Briggs, J.C. 1996. Global biogeography. Elsevier. E.U.A. 454 pp.
- CICC. 2007. Estrategia nacional de cambio climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 163 pp.
- CMNUCC. 1998. Protocolo de Kyoto. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Alemania. 25 pp.
- Common, M. y S. Stagl. 2008. Introducción a la economía ecológica. Editorial Reverté. España. 562 pp.
- CONAFOR. 2007. Ordenamiento territorial comunitario, manual básico. Comisión Nacional Forestal. México. 63 pp.
- Conde, C., R.M. Ferrer, C. Gay y R. Araujo. 2004. Impactos del cambio climático en la agricultura de México. *En*: Martínez, J. y A. Fernández (coord.). Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. México. p. 225-236.
- Cortés, J.I., A. Turrent, P. Díaz, E. Hernández, R. Mendoza y E. Aceves. 2005. Manual para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 27 pp.

- de Jong, B.H.J., S. Ochoa, M.A. Castillo, N. Ramírez y M.A. Cairns. 2000. Carbon flux and patterns of land-use/land-cover change in the Selva Lacandona, Mexico. *Ambio* 29(8): 504-511
- de Jong, B.H.J., M. Olguín, V. Maldonado, F. Rojas, F. Paz, J. Etchevers, C.O. Cruz, J.A. Argumedo. 2009. Inventario Nacional de Emisiones de GEI en el sector uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura. Memorias del I Simposio Mexicano del Carbono. México. 2 pp.
- Dionicio, I. y X. Ramírez. 2008. Comportamiento hidrográfico en el bosque mesófilo de montaña de la región noreste de Hidalgo para potenciar servicios ambientales hidrológicos. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. México. 129 pp.
- Estrada Berg, J.B., J.D. Gómez, J.W. Estrada Berg, A.I. Monterroso y J.A. Tinoco. 2008. El cambio climático en la República Mexicana, aplicaciones metodológicas en el manejo de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. México. 134 pp.
- Etchevers, J.D. y J.A. Tinoco. 2010. Estado actual de la investigación en carbono en México. Programa Mexicano del Carbono. México. 90 pp.
- Etchevers, J.D., J.A. Tinoco y J.D. Gómez. 2010. Soil organic carbon in agriculture lands of Mexico. Annual Conference of Council on Australia Latin America Relations. Australia. 15 pp.
- Fregoso, A. 2006. La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. *Gaceta Ecológica* 78:29-46
- Gómez, J.D., A.I. Monterroso y J.A. Tinoco. 2007. Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en el estado de Hidalgo bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques* 13(2): 29-49
- Gómez, J.D., A.I. Monterroso, J.A. Tinoco, M.L. Toledo, C. Conde y C. Gay. 2010. Assessing actual and potential pattern of 16 forest species driven by climate change scenarios in Mexico. Aceptado en *Atmósfera*.
- González, M. 2008. Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpavar. Ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del estado de Chiapas, México. Tesis de

- maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica. 195 pp.
- INE. 2009. Cuarta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología. México. 277 pp.
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: informe de síntesis. Cambridge University Press. Suiza. 104 pp.
- Johnson, T.M., C. Alatorre, Z. Romo y F. Liu. 2010. Low-carbon development for Mexico. The World Bank. E.U.A. 179 pp.
- Kandji, S.T., L.V. Verchot, J. Mackensen, a. Boye, M. Van Noordwijk, T.P. Tomich, C. Ong, A. Albrecht, C. Palm. 2006. Opportunities for linking climate change adaptation and mitigation through agroforestry systems. *En*: Garrity, D., A. Okono, M. Gryson y S. Parrott (eds). World Agroforestry into the future. World Agroforestry Centre. Kenya. p. 113-121.
- Krishnamurthy, L. y M. Ávila. 1999. Agroforestería básica. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México. 340 pp.
- Krishnamurthy, L., K. Krishnamurthy, I. Rajagopal y A. Arroyo. 2003. Introducción a la agroforestería para el desarrollo rural. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 105 pp.
- Lucio, M. 2006. Estimación de balances de humedad para la cuenca Amajac bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. México. 139 pp.
- Maderey, L.E. y A. Jiménez. 2005. Principios de hidrogeografía, estudio del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 102 pp.
- Metz, B., O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave y L.A. Meyer (eds.). 2007. Climate change 2007: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. E.U.A. 841 pp.
- Monterroso, A.I., J.D. Gómez, J.A. Tinoco, K. Colín y D. Hernández. 2008. Ordenamiento ecológico territorial comunitario de la Comunidad de Santiago Tlalixtlipa. Comisión Nacional Forestal, Unión de Ejidos de Producción, Explotación, Comercialización, Industrialización Agropecuaria y Forestal de la Sierra Norte de Puebla. México. 311 pp.

- Monterroso, A.I., C. Conde, J.D. Gómez, C. Gay y J.A. Tinoco. 2009. Evaluación café-agua frente a escenarios de cambio climático, caso de estudio en Veracruz, México. *Revista Electrónica de la Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas* 1(5): 29-36
- Monterroso, A.I., C. Conde, G. Rosales, J.D. Gómez y C. Gay. 2010a. Evaluación de la aptitud actual y potencial del maíz de temporal bajo escenarios de cambio climático en México. Aceptado en *Atmósfera*.
- Monterroso, A.I., J.D. Gómez, M.L. Toledo, J.A. Tinoco, C. Conde y C. Gay. 2010b. Simulated dynamics of net primary productivity (NPP) for outdoor livestock feeding coefficients driven by climate change scenarios in Mexico. Aceptado en *Atmósfera*.
- Nair, P.K. 1997. *Agroforestería*. Universidad Autónoma Chapingo. México. 543 pp.
- Nair, P.K., V.D. Nair, S.K. Saha, S.G. Haile, D.S. Howlett, A.N.G. Takimoto, E.F. Gama, R.G. Tonucci, M.R. Mosquera y B.M. Kumar. 2009. Climate change mitigation through agroforestry: science in support of the concept. *En: WAC. Book of Abstracts, 2nd World Congress of Agroforestry*. World Agroforestry Centre. Kenya. p. 9-10
- Nakicenovic, N. y R. Swart. 2000. *Emissions scenarios*. IPCC Special Report. Cambridge University Press. Inglaterra. 570 pp.
- Ongley, E.D. 1997. *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Italia. 115 pp.
- Ordoñez, J.A., B.H. de Jong, F. García, F.L. Aviña, J.V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez y O. Maser. 2008. Carbon content vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the central Highlands of Michoacán, Mexico. *Forest Ecology and Management* 255(2008): 2074-2084
- Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson (eds.). 2007. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. E.U.A. 976 pp.
- PEF. 2009. *Programa especial de cambio climático 2008-2012*. Poder Ejecutivo Federal. México. 112 pp.
- Pérez, O., C. Delfín, A. Fregoso, H. Cotler y M. Equihua. 2006. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hidrológicos. *Gaceta Ecológica* 78: 47-66

- Pineda, N.B. y R. Franco. 2008. Propuesta metodológica para la elaboración de un diagnóstico integral en el ordenamiento territorial municipal. *En*: Salinas, M.E. El ordenamiento territorial experiencias internacionales. Instituto Nacional de Ecología, Universidad de Guadalajara. México. p. 173-194.
- Raintree, J.B (ed.). 1983. Resources for agroforestry diagnosis and design. Working Paper 7. International Council for Research in Agroforestry. Kenya. 352 pp.
- Rivera, M.A. 1999. El cambio climático. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. México. 85 pp.
- Rojo, G.E., J.J. Vargas, D.J. Palma y A. Velázquez. 2005. Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Mull. Erg.) en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39(4): 449-456
- Segura, M.A., P. Sánchez, C.A. Ortiz y Ma. del C. Gutiérrez. 2005. Carbono orgánico en los suelos de México. *Terra Latinoamericana* 23(1): 21-28
- SEMARNAT. 2003. Introducción a los servicios ambientales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 71 pp.
- Solomon, S., D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.). 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. Cambridge University Press. E.U.A. 996 pp.
- Soto, L., G. Jiménez y T. Lerner. 2008. Diseño de sistemas agroforestales para la producción y la conservación, experiencia y tradición en Chiapas. El Colegio de la Frontera Sur. México. 93 pp.
- Terrazas, L., I. Nikolskii, S.S. Herrera, M. Castillo y A.A. Exebio. 2010. Alteración de la fertilidad del suelo y vulnerabilidad de maíz y trigo bajo riego debido al cambio climático. *Tecnologías y Ciencias del Agua* 1(1): 135-150
- Tinoco, J.A., A.I. Monterroso y J.D. Gómez. 2009. Efectos del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Nazas, México. *Revista Electrónica de la Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas* 1(5): 42-50
- Torquebiau, E. 1993. Conceptos de agroforestería: una introducción. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo. México. 92 pp.

Torres, J., A. Tenorio y A. Gómez (eds.). 2008. Agroforestería: una estrategia de adaptación al cambio climático. Comisión Europea, Soluciones Prácticas-ITDG. Perú. 125 pp.

CAPÍTULO III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

Diseñar tecnologías agroforestales en la cuenca del Río Platanar para evaluar su capacidad de mitigación de dióxido de carbono y de recarga de agua al subsuelo, y su potencial como estrategia de adaptación al cambio climático.

Objetivos específicos

1. Describir las características del medio físico de la cuenca.
2. Cuantificar el contenido de carbono en la biomasa del uso actual de la tierra.
3. Cuantificar el contenido de carbono orgánico en el suelo del uso actual de la tierra.
4. Estimar el volumen de recarga de agua del uso actual de la tierra.
5. Diseñar tecnologías agroforestales con base en las características del paisaje.
6. Evaluar la captura de carbono y la recarga de agua de las tecnologías agroforestales propuestas.
7. Evaluar el potencial de las tecnologías agroforestales propuestas como estrategia de adaptación al cambio climático.

Hipótesis

1. Las comunidades vegetales de selva presentan mayor cantidad de carbono en la biomasa y de carbono orgánico en el suelo en comparación con los pastizales.
2. En las zonas bajas de la cuenca se presenta la mayor recarga de agua hacia el subsuelo.

3. Las tecnologías agroforestales presentan mayor cantidad de carbono almacenado en la biomasa y en el suelo, además de un mayor volumen de recarga de agua hacia el subsuelo en comparación con el uso tradicional de la tierra.

CAPÍTULO IV. EL ÁREA DE ESTUDIO

Localización

La cuenca del río Platanar se localiza en la región norte del estado de Chiapas, entre las coordenadas máximas 17° 37' 48" y 17° 21' 00" de latitud norte; y 93° 28' 48" y 93° 08' 24" de longitud oeste (Figura 1). Con base en el marco geoestadístico municipal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2005), la cuenca se ubica en territorio de seis municipios de la misma entidad federativa (Cuadro 1): Sunuapa, Pichucalco, Ostucán, Juárez, Ixtacomitán y Chapultenango; de los cuales Pichucalco es el que ocupa la mayor superficie con 17,448 hectáreas que corresponden al 41.1% del total.

Topografía

La variación altitudinal que se presenta en la cuenca (INEGI, 2009) oscila entre los 40 y los 1,200 m. La zona con menor altitud se encuentra al noroeste en la desembocadura del río Platanar, por el contrario, la zona con mayor elevación es la cumbre del volcán El Chichonal ubicada en el extremo sureste de la cuenca. Otros sistemas montañosos de relevancia son *Cerro el Gavilán* con 1,1120 msnm, *Cerro El Cucayo* con 940 msnm y *Cerro El Zopilote* con 660 msnm. En la Figura 2 se muestra el Modelo Digital de Elevación con el detalle de los sistemas orográficos de la Cuenca.

Cuadro 1. Superficies de los municipios que se encuentran en la cuenca del Río Platanar

Municipio	Superficie	
	ha	%
Sunuapa	6,997.3	16.5
Pichucalco	17,447.9	41.1
Ostucán	16,429.1	38.7
Juárez	0.9	0.002
Ixtacomitán	152.5	0.4
Chapultenango	1,448.9	3.4

Fuente: INEGI, 2005

Altura (msnm)

30 - 50	401 - 450	801 - 850
51 - 100	451 - 500	851 - 900
101 - 150	501 - 550	901 - 950
151 - 200	551 - 600	951 - 1,000
201 - 250	601 - 650	1,001 - 1,050
251 - 300	651 - 700	1,051 - 1,100
301 - 350	701 - 750	1,101 - 1,150
351 - 400	751 - 800	1,151 - 1,200

45

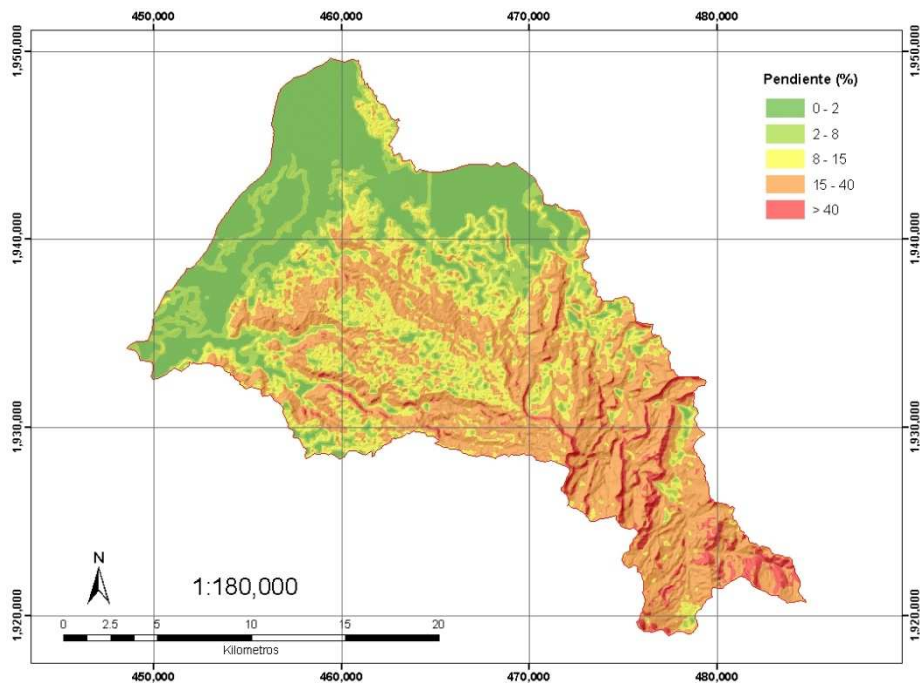


Figura 3. Distribución de la pendiente en la cuenca del Río Platanar

Cuadro 2. Superficie por intervalo de pendiente en la cuenca del Río Platanar

Intervalo de Pendiente (%)	Descripción	Superficie	
		ha	%
0-2	Plano	9,660.2	22.8
2 - 8	Moderadamente inclinado	5,734.0	13.5
8-15	Inclinado	8,701.9	20.5
15-40	Moderadamente escarpado	16,302.3	38.4
>40	Escarpado	2,047.0	4.8

Fuente: CONAGUA-UACH, 2009

Con respecto a la orientación del terreno, en la cuenca del Río Platanar predomina la orientación sureste con el 25.6% de la superficie total. En el Cuadro 3 se presenta la superficie ocupada por cada clase.

Fisiografía

Con base en la regionalización de INEGI (2001), la cuenca pertenece a dos Provincias Fisiográficas: *Llanura Costera del Golfo Sur*, representada por la subprovincia de *Llanuras y Pantanos Tabasqueños* y la provincia *Sierras de Chiapas y Guatemala*, representada por la subprovincia de *Sierras del Norte de Chiapas* (Figura 4). La primera subprovincia ocupa 17,048.2 ha (40.2% de la superficie) y la segunda ocupa 25,428.7ha (59.8% de la superficie). El sistema de topoformas que reporta el INEGI (2002a) para la cuenca son tres unidades: *Sierra Alta Escarpada Compleja*, *Llanura Aluvial* y *Lomerío Típico*, la primera comprende la totalidad de la subprovincia de Sierras del Norte de Chiapas, por su parte las dos topoformas restantes se ubican en la subprovincia de Llanuras y Pantanos Tabasqueños las cuales ocupan una superficie de 3,505.8 ha y 13,542.4 ha respectivamente.

Cuadro 3. Orientación de la pendiente en la cuenca del Río Platanar

Orientación	Superficie	
	ha	%
Plana (sin orientación)	6,319.1	14.9
Norte	1,467.2	3.4
Noroeste	2,466.9	5.8
Noreste	4,859.0	11.4
Oeste	4,978.0	11.7
Este	5,519.3	13.0
Sur	0.0	0.0
Sureste	10,871.2	25.6
Suroeste	5,957.6	14.0

Fuente: CONAGUA-UACH, 2009

Geología

En la región de los estados de Chiapas y Tabasco, aflora una amplia secuencia del Mesozoico y Cenozoico constituida por rocas sedimentarias marinas, plegadas y afalladas. Esta secuencia descansa sobre un basamento cristalino del Precámbrico y Paleozoico, éstas rocas forman un complejo batolítico y metamórfico que constituye el núcleo de la Sierra de Soconusco.

En el estudio realizado por Müllerried (1957) se considera que gran parte de la Sierra de Soconusco se encontraba formada por rocas precámbricas ígneas y metamórficas. En la parte central de Chiapas, sobre la formación Todos Santos, descansa una secuencia sedimentaria marina del Jurásico Superior que está formada por calizas de facies someras con algunas intercalaciones de sedimentos continentales.

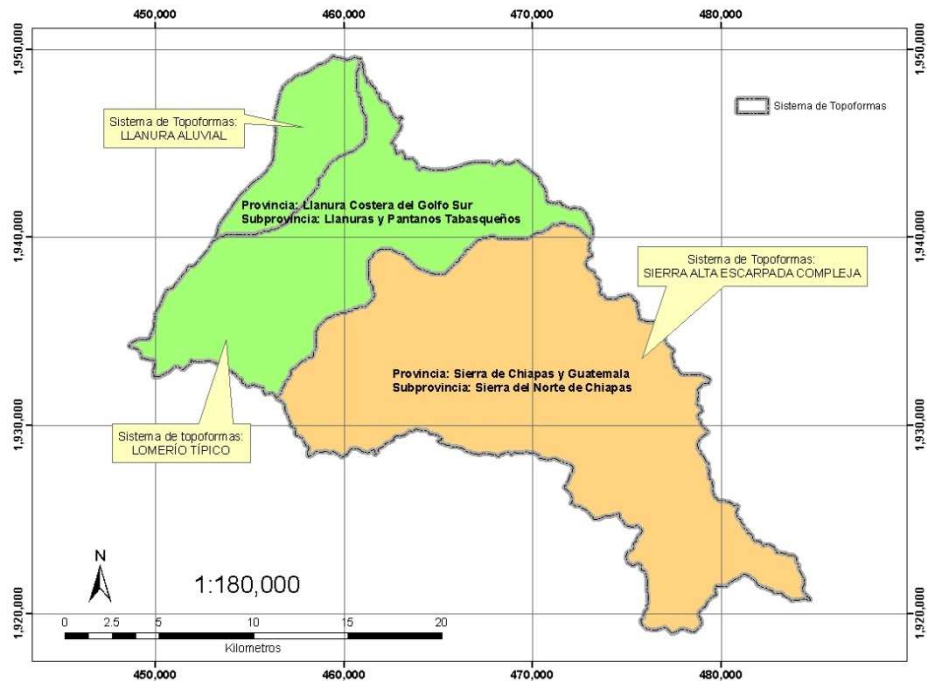


Figura 4. Fisiografía de la cuenca del Río Platanar

López (1990) ha interpretado la existencia de una cuenca salina que ocupaba gran parte de la actual Sierra de Chiapas, de la Llanura costera del Golfo y de la Plataforma Continental de Tabasco. En el área de Cintalapa la secuencia neocomiana ha sido denominada Formación San Ricardo, que está compuesta de lutitas, areniscas rojas con intercalaciones de caliza, dolomía y algunos horizontes de yeso.

En la parte central de Chiapas afloran cuantiosos sedimentos calcáreos del Cretácico Superior. Durante el Terciario, se inicia en gran parte de Chiapas y Tabasco, la sedimentación terrígena marina, producto del levantamiento de la porción occidental de México y el plegamiento de la Sierra Madre Oriental. En el Cenozoico se desarrolla la

actividad volcánica, desde los Tuxtlas, en el estado de Veracruz hasta el volcán Chichonal en el estado de Tabasco.

En la cartografía realizada por INEGI (2002b), se reportan cinco tipos de roca presentes en la cuenca del Río Platanar: caliza del cretácico, andesita con brecha volcánica intermedia del cuaternario, brecha volcánica intermedia del cuaternario, lutita con arenisca del terciario y arenisca del terciario; además materiales aluviales del cuaternario. En el Cuadro 4 se presenta el área de distribución de cada tipo de roca en donde se observa que las areniscas del terciario son las más abundantes con 19,741.1 ha que corresponden al 46.5% de la superficie total.

Cuadro 4. Superficie por tipo de roca presente en la cuenca del Río Platanar

Tipo de roca	Superficie	
	ha	%
Caliza del cretácico [Ks(cz)]	714.8	1.7
Andesita con brecha volcánica del cuaternario [Q(A-Bvi)]	8,773.2	20.7
Brecha volcánica del cuaternario [Q(Bvi)]	40.2	0.1
Lutita con arenisca del terciario [T(lu-ar)]	5,283.6	12.4
Arenisca del terciario [T(ar)]	19,741.1	46.5
Suelo aluvial del cuaternario (Q(al))	7,857.4	18.6

cz-caliza, A-andesita, Bv-brecha volcánica intermedia, Lu-Lutita, ar-arenisca, al-suelo aluvial,
Ks-cretácico superior, Q-cuaternario, Te-terciario
Fuente: INEGI, 2002b

En la Figura 5 se presenta la distribución espacial de los tipos de roca. Las rocas ígneas (andesita con brecha volcánica intermedia y brecha volcánica intermedia) son el resultado de la erupción del volcán Chichonal en marzo de 1982 por lo que se presentan en forma de derrame, en el caso del suelo aluvial, éste se ubica en las partes bajas de la cuenca y su presencia se debe al proceso de deposición de sedimentos provenientes de la parte alta. Las rocas sedimentarias (caliza, lutita con arenisca y arenisca) se encuentran principalmente en las zonas este y sureste de la cuenca.

El Servicio Geológico Mexicano (SGM) (Islas *et al.*, 2005) presenta un mapa con mayor información de la geología de la cuenca (Figura 6). En este se reportan seis tipos de roca: arenisca con conglomerado polimíctico del terciario, arenisca con lutita del terciario, brecha andesítica con andesita del terciario, brecha andesítica con andesita del cuaternario, caliza con dolomita del cretácico y caliza con lutita del cretácico.

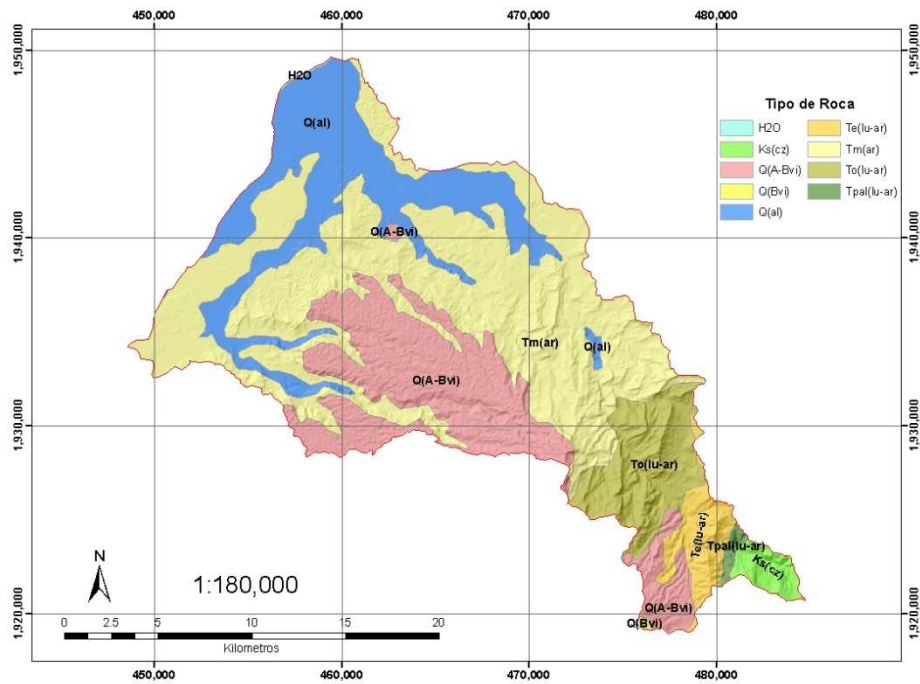


Figura 5. Tipos de roca en la cuenca del Río Platanar

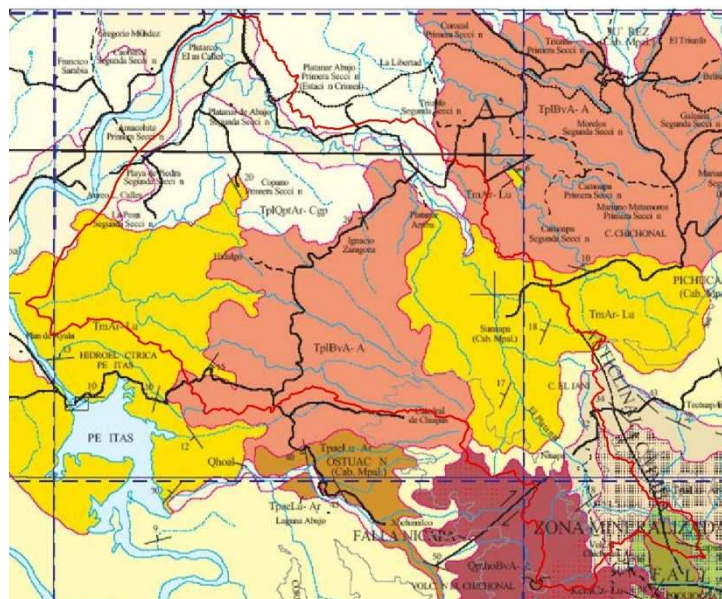


Figura 6. Tipos de rocas reportados por el SGM para la cuenca del Río Platanar

En la década de 1980, Morales y colaboradores realizaron estudios geológicos en el municipio de Ostucán ubicado en la parte central de la cuenca. Como resultado encontraron que la geología del municipio se compone de rocas sedimentarias del terciario en la base, cuya edad varía del Eoceno al Mioceno con una cubierta formada por un paquete de rocas volcánicas. Los estudios mineralógicos efectuados sobre muestras de la misma zona, indican que los principales componentes en orden descendente de ocurrencia son: Gibbsita, Caolinita, Magnetita, Cuarzo y Goethita. La columna litológica observada en este municipio, está constituida principalmente por sedimentos de tipo FLISH del Terciario, coronados en discordancia por un paquete volcánico de composición ácida (brechas andesíticas, traquiandesíticas, tobas, cenizas y escorias volcánicas) de finales del Terciario-Cuaternario. También se encuentran sedimentos recientes como: arenas, gravas, limos y arcillas acumuladas en las partes bajas. Estructuralmente el área se encuentra afectada por fracturas con diferente orientación y fallas de tipo normal los cuales no afectaron considerablemente la zona. Además se cuenta con estructuras de anticlinal y sinclinal generalmente suaves con orientación noroeste-sureste (Morales *et al.*, 1987).

Clima

La cartografía climática de INEGI (2000a) con base en la clasificación de Köppen modificado por García (2004) a escala un millón, reporta que en la totalidad de la cuenca se presenta el clima cálido húmedo con régimen de lluvias intermedias [Af(m)], mismo que está definido por la temperatura media anual que sobrepasa los 22°C, la temperatura media del mes más frío está por encima de los 18°C, el régimen de lluvias es intermedio y la precipitación invernal respecto a la total anual es mayor del 18%.

Con respecto a las variables temperatura y precipitación INEGI (2000b) establece que la lluvia media anual en el área se encuentra en el intervalo de 2,500 mm a 4,500 mm, la planicie de la zona norte es en donde se presenta la menor cantidad de lluvia y en la zona sureste es en donde la cantidad de precipitación es mayor debido a los sistemas montañosos que obligan a subir y a enfriarse a los vientos provenientes del Golfo de México, lo que conlleva a la formación de nubes y precipitación. Con respecto a la

temperatura media anual se reporta un intervalo que oscila entre 20 °C y 26 °C, la región con menor temperatura se ubica en la parte sureste, en las máximas elevaciones de la cuenca. Por el contrario, la región norte es donde se presentan las temperaturas más altas debido a la baja altitud. En la Figura 7 se presenta la distribución espacial de ambas variables.

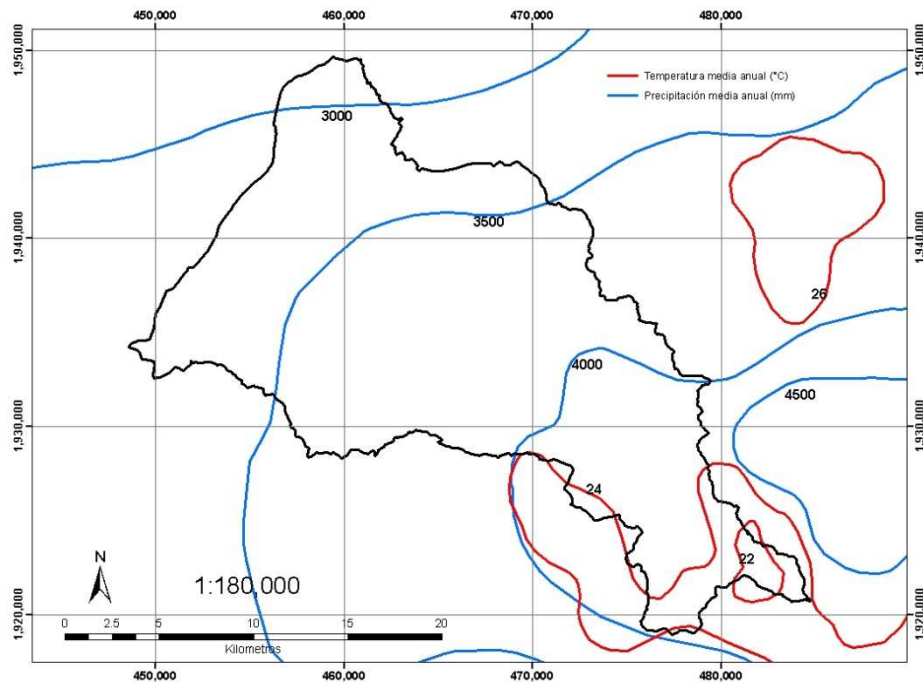


Figura 7. Isolíneas de temperatura y precipitación media anual en la cuenca del Río Platanar

La única estación meteorológica que se ubica dentro de la cuenca es la de “Platanar de Arriba” (clave 7130) ubicada en el municipio de Pichucalco en la zona noroeste de la cuenca. La estación reporta una precipitación media anual de 2,986 mm y una temperatura media anual de 25.8 °C. En el Cuadro 5 se presentan los valores mensuales de las variables temperatura (media, mínima, máxima), precipitación y evaporación que se tienen registradas en la estación para el periodo 1971-2000 (SMN, 2009).

Hidrología

La cuenca del río Platanar se ubica dentro de la región hidrológica número 30 (Grijalva-Usumacinta), la cual pertenece a su vez a la región hidrológica administrativa Golfo Sur (CNA, 2000). Con base en la división de cuencas hidrográficas a nivel nacional realizada por Mondragón *et al.* (2007), el río Platanar pertenece a la cuenca Grijalva-Usumacinta, la cual desemboca en el Golfo de México.

Cuadro 5. Normales climáticas de la estación meteorológica Platanar de arriba

Variable	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Temperatura media (°C)	22.1	22.8	25.8	27.5	28.8	27.9	27.4	27.2	27.1	25.7	24.5	22.6	25.8
Temperatura mínima (°C)	14.1	16.3	16.3	18.5	19.5	18.9	18.4	18.4	18.7	17.4	17.6	14.7	17.4
Temperatura máxima (°C)	30.0	30.8	34.1	36.5	36.6	35.6	34.6	33.9	33.7	32.5	31.1	29.9	33.3
Precipitación media (mm)	164.1	173.9	60.3	56.2	151.0	292.5	274.7	396.2	430.8	422.1	261.7	212.7	2,896.2
Evaporación (mm)	54.7	55.9	102.0	116.6	130.7	107.7	110.1	103.0	97.0	84.2	68.1	55.5	1,085.5

Fuente: SMN, 2009

El cauce principal de la cuenca (Platanar) tiene una longitud total de 53.8 km, desemboca en la corriente del río Grijalva, al noreste de la comunidad de Plutarco Elías Calles, por lo que se clasifica como una cuenca exorreica. Debido a la distribución espacial de las corrientes superficiales, el patrón de drenaje se cataloga como dendrítico.

El río Platanar nace en la zona sureste de la cuenca gracias a los escurrimientos superficiales provenientes de las laderas del volcán Chichonal. En su transcurso es alimentado por manantiales y otros cauces como son el arroyo de Cal, que se origina en el cerro El Gavilán; el arroyo Lajas al norte de la cabecera municipal de Nicapa; el río Cucayo al norte de la población con el mismo nombre; el arroyo Guayma y el arroyo Copano ubicado al sureste de la comunidad Plutarco Elías Calles. En la Figura 8 se presenta la red hidrográfica de la cuenca. Las características físicas de la cuenca se presentan en el Cuadro 6.

Con respecto a la hidrología subterránea, la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2006) ubica a la cuenca dentro del acuífero Reforma (clave 702). El acuífero está formado fundamentalmente por sedimentos granulares, principalmente arenas de grano fino. La

profundidad del nivel estático se encuentra alrededor de los 10 m, mientras que datos obtenidos de los pozos reportan profundidades que oscilan entre 25 m y 60 m y caudales de 50 lps a 120 lps (CNA, 2002).

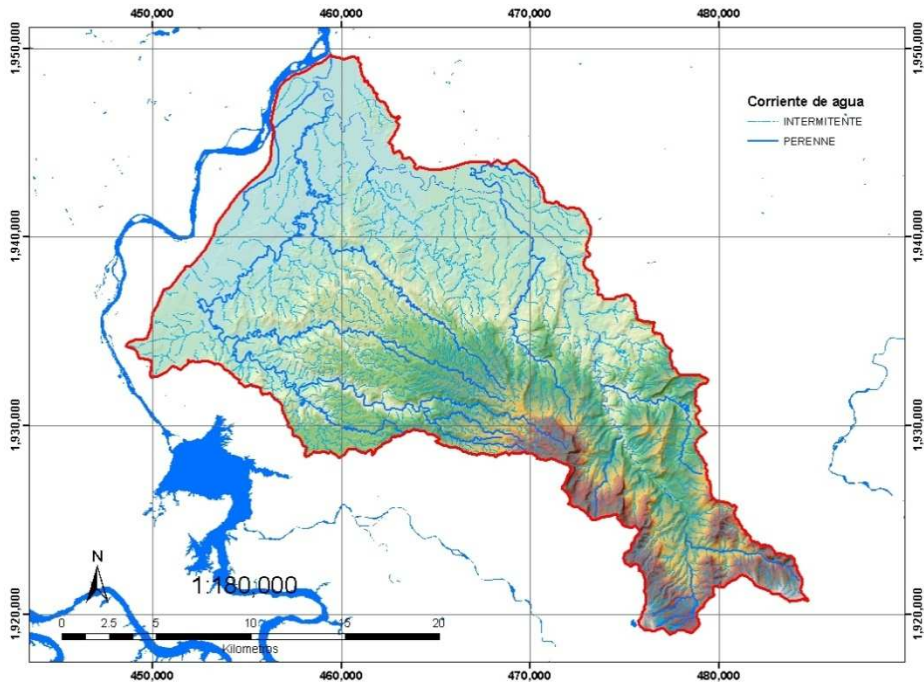


Figura 8. Hidrología superficial de la cuenca del Río Platanar

Cuadro 6. Características físicas de la cuenca del Río Platanar

Indicador	Valor
Índice de forma	0.14 adim.
Relación de circularidad	0.31 adim.
Coeficiente de compacidad	1.77 adim.
Proporción de elongación	0.43 adim.
Sistema de drenaje	Dendrítico
Relación de bifurcación media	3 adim.
Densidad de drenaje	0.62 km/km ²
Densidad hidrográfica	0.08 corrientes/km ²

Fuente: CONAGUA-UACH, 2009

Suelo

La combinación de la fisiografía, geología, condiciones climáticas y las comunidades vegetales han dado origen a las características edáficas de los distintos suelos de la

cuenca del Río Platanar. El INEGI (2003) reporta la presencia de 10 unidades primarias de suelo en 20 distintas combinaciones con base en la clasificación de FAO/UNESCO. Los tipos de suelo cambisol crómico y acrisol húmico son las unidades predominantes con el 41.9% y el 23.4% de la superficie total, respectivamente. En el Cuadro 7 se presenta la superficie de todas las unidades de suelo y en la Figura 9 su distribución espacial.

Cuadro 7. Superficie por tipo de suelo presente en la cuenca del Río Platanar

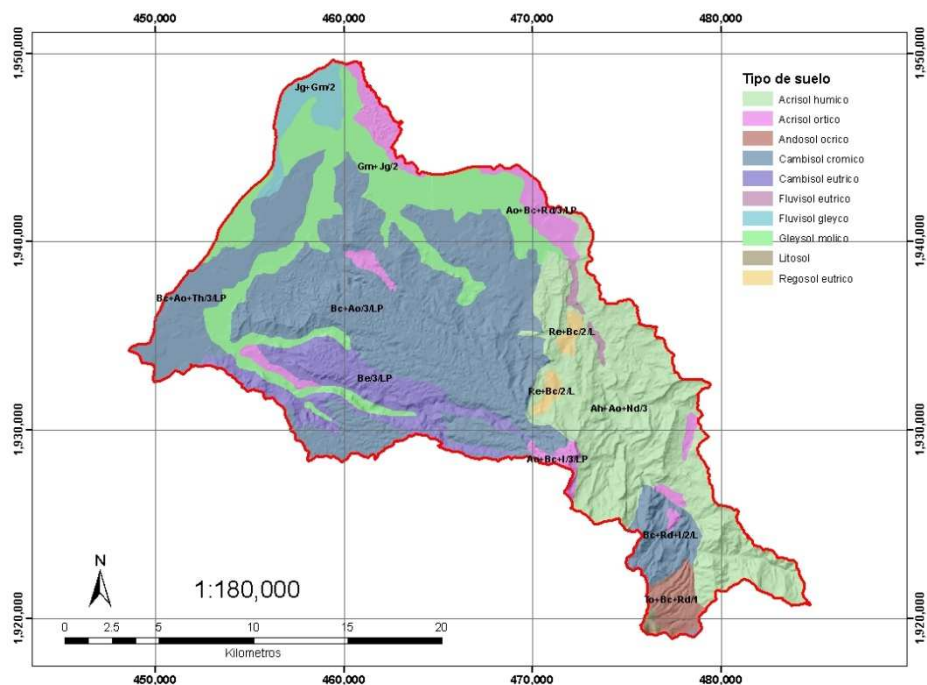
Tipo de suelo	Superficie		Tipo de suelo	Superficie	
	ha	%		ha	%
Cambisol crómico (Bc)	17,786.2	41.9	Fluvisolgleycó (Jg)	1,028.9	2.4
Acrisol húmico (Ah)	9,921.2	23.4	Andosolocrómico (To)	757.1	1.8
Gleysolmólico (Gm)	6,625.3	15.6	Regosoleutrítico (Re)	383.3	0.9
Cambisoleutrítico (Be)	3,301.8	7.8	Fluvisoleutrítico (Je)	210.6	0.5
Acrisolórtico (Ao)	2,316.6	5.5	Litosol (I)	115.0	0.3

Fuente: INEGI, 2002a

En el estudio que llevó a cabo López (1995) con relación a los tipos de vegetación del estado de Tabasco y norte de Chiapas, se menciona que los suelos de la comunidad vegetal selva alta perennifolia de Ramón que se encuentra dentro de la cuenca tienen buen escurrimiento superficial derivado del relieve en que se encuentran, pero su drenaje interno es deficiente por ser arcilloso. Son muy ricos en óxidos de hierro y aluminio y se desarrollan *in situ*.

Uso de la tierra

Los principales usos que se le dan a la tierra en la cuenca con base en lo reportado por el inventario nacional forestal (SEMARNAT-UNAM, 2001) son tres: pecuario, forestal y agrícola. El uso pecuario es la principal actividad con 28,511.6 ha que representan el 67.2% del área total. El uso forestal y agrícola por su parte, ocupan el 17.8% y el 13.9% respectivamente. En la Figura 10 se presenta el mapa con la distribución espacial de los usos de la tierra.



López (1995) menciona que desde antes de la conquista española, en la región se ha venido produciendo maíz, frijol y otros cultivos a través de la técnica de roza-tumba-quema por parte de las comunidades autóctonas choles, tzeltales y zoques. En la actualidad, con el avance de la ganadería la actividad agrícola ha sido desplazada hacia las áreas más abruptas, observándose una tendencia hacia su extinción, excepto en algunas zonas con valles amplios. La producción de cacao (*Theobroma cacao*) es otra actividad practicada desde la época prehispánica y que en la actualidad aún tiene importancia en lugares que no exceden de los 350 msnm, principalmente a la orilla de los ríos y arroyos sobre suelos aluviales o bien sobre suelos rojos arcillosos ubicados cerca de las corrientes fluviales, cuando estas no depositan sedimentos. Se estima que un 10% de la superficie cultivada de cacao en la región coincide con el área de distribución de la selva alta perennifolia de ramón, específicamente en los municipios de Pichucalco, Ostucán, Sunuapa, entre otros.

La ganadería es una actividad que inició en la época colonial, cobró importancia hasta la década de 1940 y desde 1960s se ha extendido considerablemente. Los pastizales de

elefante (*Pennisetum purpureum*), estrella de África (*Cynodonn lemfuensis*) y gramas inducidas (*Paspalum notatum*, *Axonopus compresus*), han reemplazado a la vegetación primaria y secundaria, a la producción de maíz, frijol, arroz, calabaza, etc., y en época de bajos precios han sustituido al cultivo del café y cacao. La recolección de barbasco (*Dioscorea composita*) y la caza, son procesos de trabajo que prácticamente ya no existen por la destrucción de los ecosistemas naturales. La leche producida se vende principalmente a la compañía transnacional NESTLE y la carne se destina al mercado del Distrito Federal para hacer posible en parte que el norte del país abastezca la demanda de Estados Unidos (López, 1995).

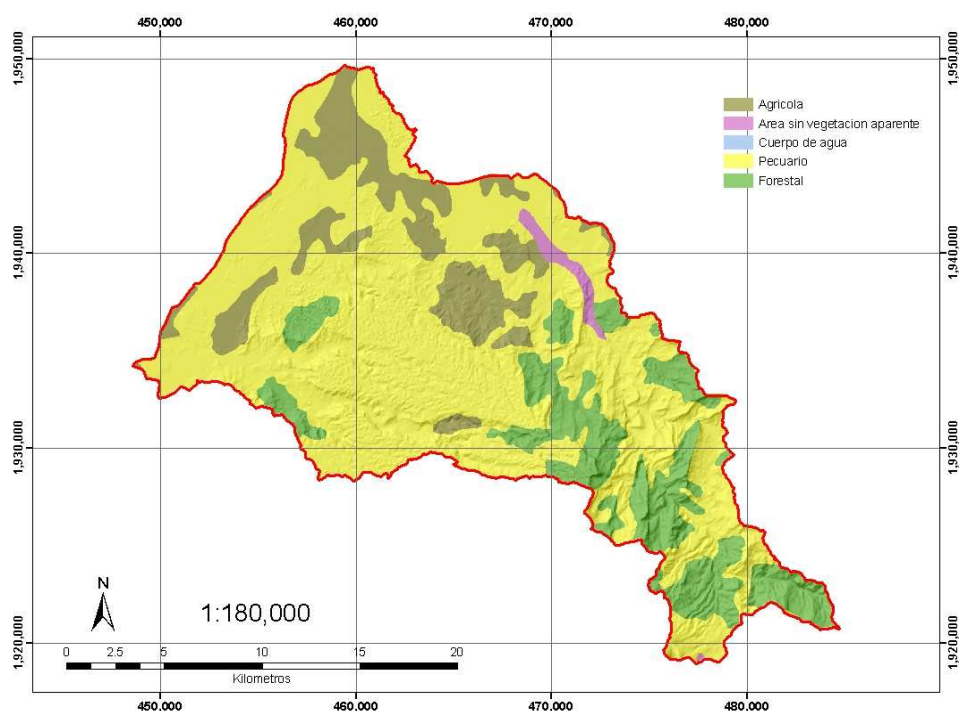


Figura 10. Usos de la tierra en la cuenca del Río Platanar

Biodiversidad

La cuenca del Río Platanar se ubica dentro de la región biogeográfica neotropical, la cual comprende el área de las tierras bajas de México, Centroamérica y toda América del Sur. El inventario nacional forestal del año 2001 (SEMARNAT-UNAM, 2001) reporta la presencia de relictos de *Selva Alta* y *Mediana Perennifolia* en el 17.8% de la superficie de la cuenca, con esto se asume que esta comunidad vegetal era la

predominante en la cuenca antes de ser perturbada por las actividades antropogénicas (Figura 11).

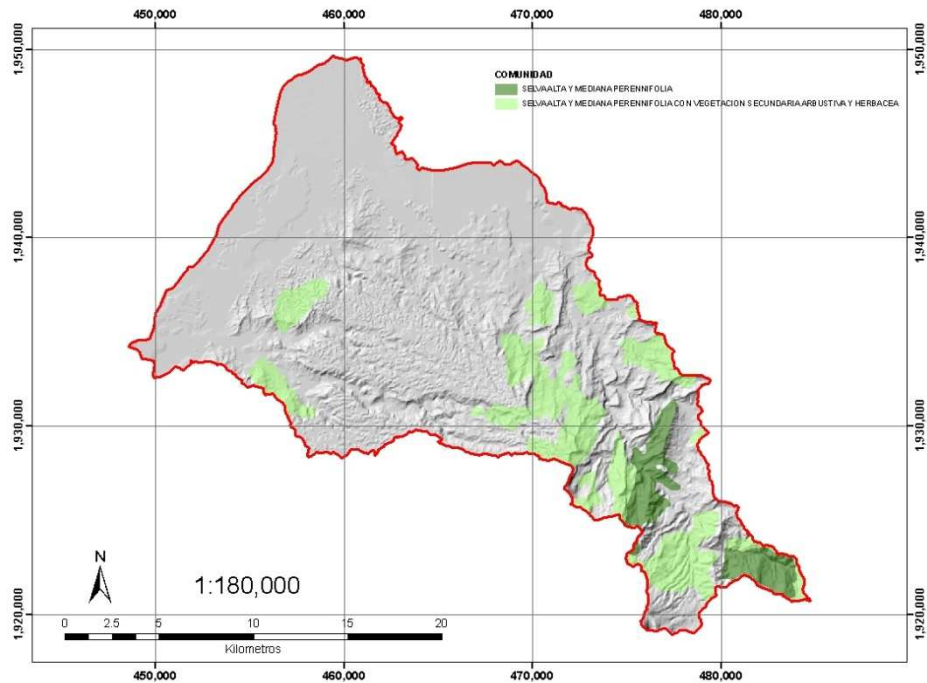


Figura 11. Comunidades vegetales en la cuenca del Río Platanar

En la caracterización de la distribución de los tipos de vegetación en el norte de Chiapas, López (1995) reporta que en la cuenca se desarrolla la *Selva Alta Perennifolia de Ramón*. Esta comunidad vegetal se compone de cuatro estratos: arbustivo (1-4 m), arbóreo bajo (5-10 m), arbóreo medio (11-20 m) y arbóreo alto (> 21 m); el número de especies por hectáreas estimado para cada estrato es de 36, 34, 26 y 21, respectivamente.

En el estrato arbóreo alto, se reporta la dominancia de especies como el ramón (*Brosimum alicastrum*), el huapaque (*Dialium guianense*), el chicozapote (*Manilkara zapota*), el zopo (*Guatteria anómala*), el tinco (*Vatairea lundellii*), entre otros. En el estrato arbóreo medio las especies dominantes son la mamba (*Pseudolmedia oxyphyllaria*), el luin (*Ampelocera hottlei*), el castaño (*Sterculia mexicana*), el molinillo (*Quararibea funebris*), la papaya botijona (*Bermoullia flammea*), entre otras. Con respecto al estrato arbóreo inferior las especies principales encontradas son el botoncillo (*Rinorea guatemalensis*), la bellota roja (*Sterculia* sp.), el quebracho prieto (*Cupania*

sp.), el patastillo (*Alchornea latifolia*), el orejuelo (*Cymbopetalum penduliflorum*), etc. En el sotobosque dominan las palmas umbrófilas tales como el chichón (*Astrocaryum mexicanum*), el shate (*Chamaedorea* sp.), la guaya (*Chamaedorea* sp.), el pojay (*Geonoma magnifica*), la escoba (*Chrysophylla argéntea*) y el guano talíz (*Calytrogyne hiesbreohtiana*).

Referente a la fauna, la cuenca se encuentra dentro de la región natural tropical baja (Álvarez y de la Chica, 1991), esta región forma todo un continuo y abarca ambas costas desde el norte de Sinaloa en el oeste y desde el sur de Tamaulipas en el este, incluyendo la península de Yucatán y la cuenca del Balsas. La fauna de anfibios es muy rica y variada, representada principalmente por los anuros. Los reptiles son abundantes y alcanzan tamaños considerables, como los cocodrilos (*Crocodylus* spp.) y caimanes (*Caiman* spp.). Entre las tortugas hay varios géneros importantes como las llamadas tortugas aplanadas (*Dermatemys* spp.), y la jicotea (*Chrysemys* spp.); los guau (*Staurotypus* spp.) y los pochitoques (*Kinosternon* spp.) que aunque no son de gran tamaño, pueden ser por su abundancia una fuente alimenticia muy importante.

Las aves son también muy abundantes y variadas y es quizá el grupo de vertebrados más conspicuo en las regiones tropicales, ya sea por su canto o bien por el llamativo plumaje de muchas de ellas. Entre ellas se pueden nombrar a las perdices (*Tinamus* spp.) de las comarcas del Golfo, y la perdíz canela (*Crypturellus* spp.). En las regiones boscosas se encuentra el faisán real (*Crax* spp.); cojolite (*Penelope* spp.), chachalacas (*Ortalis* spp.), codornices (*Lophortyx* spp.); cuiche (*Colinus* spp.), guajolote (*Agriocharis* spp.) actualmente muy escaso, entre otras muchas. Los mamíferos también están adaptados en su mayoría a la vida arbórea o acuática, aunque existen muchos netamente terrestres. Algunas especies son los tlacuaches (*Didelphis* spp.), cuatro ojillos (*Philander* spp.), mono araña (*Ateles* spp.), sarahuato (*Alouata* spp.), armadillo (*Daspus* spp.), conejos (*Sylvilagus* spp.), ardilla de árbol (*Sciurus* spp.), tuzas (*Heterogeomys* spp.), puerco espín (*Coendus* spp.), coatuza (*Dasiprocta* spp.), tepescuintle (*Cuniculus* spp.), coyote (*Canis latrans*), mapache (*Procyon* spp.), venado de cola blanca (*Odocoileus virginianus*) y temazate (*Mazama* spp.), etc.

Literatura citada

- Álvarez, T. y F. de la Chica. 1991. Zoogeografía de los vertebrados de México. Instituto Politécnico Nacional. México. 65 pp.
- CNA. 2000. Regiones hidrológicas administrativas de la República Mexicana. Comisión Nacional del Agua. México. (cartografía digital).
- CNA. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero reforma, estado de Chiapas. Comisión Nacional del Agua. México. 14 pp.
- CNA. 2006. Acuíferos de la República Mexicana. Comisión Nacional del Agua. México. (cartografía digital).
- CONAGUA-UACh. 2009. Proyecto de restauración hidrológica-ambiental de las partes medias y altas de la cuenca del Río Platanar, comprendida entre los estados de Tabasco y Chiapas. Informe final. Comisión Nacional del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. 574 pp.
- Cortés, J.I., A. Turrent, P. Díaz, E. Hernández, R. Mendoza y E. Aceves. 2005. Manual para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada con árboles frutales en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 27 pp.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 90 pp.
- INEGI. 2000a. Unidades climáticas de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2000b. Isolíneas de temperatura y precipitación media anual de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2001. Provincias y subprovincias fisiográficas de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Informática y Geografía. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2002a. Sistema de topoformas de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Informática y Geografía. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2002b. Geología de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Informática y Geografía. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2003. Unidades de suelo de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. (cartografía digital).

- INEGI. 2005. Marco geoestadístico municipal. Instituto Nacional de Estadística, Informática y Geografía. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2009. Continuo de elevaciones mexicano. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. (cartografía digital).
- Islas, J.J., M.G. Ramírez, A. Gómez, J.P. Moreno, J.A. Wingartz y J.L. Mendieta. 2005. Carta geológico-minera Villahermosa clave E15-8. Servicio Geológico Mexicano. México. (cartografía digital).
- López, E. 2008. Geología general y de México. Editorial Trillas. México. 288 pp.
- López, R. 1995. Tipos de vegetación y su distribución en el estado de Tabasco y norte de Chiapas. Universidad Autónoma Chapingo. México. 121 pp.
- Mondragón, R., A. Garrido, H. Cottler, A. Díaz, J. Rodríguez, V.M. Romero, N. Luna, C. Enríquez, y M.L. Cueva. 2007. Cuencas hidrográficas de México escala 250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; Instituto Nacional de Ecología; Comisión Nacional del Agua. México. (cartografía digital).
- Morales, A., J.A. Salazar, M. Moreno, M. Orozco y M.A. Villanueva. 1987. Proyecto Ostuacán, Chiapas. Informe de actividades. Consejo de Recursos Minerales. México. 53 pp.
- Morales, A., M. Orozco, J.A. Salazar, M. Moreno, y M.A. Villanueva. 1988. Lateritas bauxíticas de Ostuacán, Chiapas. Consejo de Recursos Minerales. México. 61 pp.
- Müllerried, K.G. 1957. Geología de Chiapas. Gobierno del Estado de Chiapas, México, 177 pp.
- SEMARNAT-UNAM. 2001. Inventario nacional forestal de México 2001 escala 250,000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Universidad Nacional Autónoma de México. México. (cartografía digital).
- SMN. 2009. Normales climatológicas de la estación meteorológica Platanar de arriba. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/normales/estacion/chis/>. Consultado el 12/Febrero/2010.

CAPÍTULO V. DETERMINACIÓN DE LOS ALMACENES DE CARBONO EN LA BIOMASA AÉREA DE LOS ECOSISTEMAS DE LA CUENCA DEL RÍO PLATANAR, CHIAPAS¹

Resumen

Se determinó la cantidad de carbono en la biomasa aérea de las comunidades vegetales de la cuenca del Río Platanar localizada en la zona norte del estado de Chiapas con base en métodos indirectos. Para ello se delimitaron unidades de integración territorial en las cuales se establecieron parcelas de muestreo de 400 m² en donde se realizó un inventario florístico y se calculó el índice de valor de importancia a cada especie encontrada. Para las especies más representativas de cada comunidad vegetal se buscaron ecuaciones alométricas para estimar su contenido de materia seca y posteriormente su contenido de carbono al aplicar el factor de 0.5. En la comunidad selva alta perennifolia con vegetación secundaria fue en donde se encontró la mayor cantidad de carbono con 99.7 MgC ha⁻¹. La comunidad pastizal cultivado, que registra la mayor superficie en la cuenca con 31,153.8 hectáreas, reporta un contenido de carbono de 10 MgC ha⁻¹.

PALABRAS CLAVE: servicios ambientales, línea base de carbono, ecuaciones alométricas

Abstract

It was estimated the aboveground carbon budget with indirect methods in ecosystems of Rio Platanar watershed that is located in the north of Chiapas State. For this, we delimited integration territorial units and established sample plots of 400 m², a floristic inventory have done in each sample plot to calculate the ecological importance index. We search allometric equations for the most representative species to estimate the total biomass and carbon content applying the 0.5 factor. In the community perennial forest

¹ Tinoco, J.A., J.D. Gómez, A.I. Monterroso, A. Vázquez, L. Krishnamurthy, C.A. Tavarez y M.V. Gutiérrez. Para ser enviado a Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente

was found the highest carbon content with 99.7 MgC ha⁻¹. The grassland community is the dominant ecosystem with 31,153.8 ha in the watershed and reports a carbon content of 10 MgC ha⁻¹.

KEY WORDS: environment services, carbon base line, allometric equations

Introducción

El cambio climático por el que está atravesando actualmente el planeta es un fenómeno que se origina por el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, los GEI permiten el paso de la radiación de onda corta proveniente del espacio, pero al ser reflejada por la superficie terrestre es convertida en radiación de onda larga parte de la cual es absorbida y emitida de regreso a la Tierra por estos gases de invernadero, lo que conlleva a un incremento en la temperatura de la atmósfera (CICC, 2007). El dióxido de carbono (CO₂) se ha considerado como el principal gas de invernadero debido a que sus emisiones son las más abundantes en comparación con los otros GEI, se estima que las concentraciones de CO₂ antes de la revolución industrial eran de 280 partes por millón (ppm), actualmente son de 380 ppm o 430 ppm si se considera a todos los GEI en términos de su equivalencia en CO₂. Esta cifra es la concentración más alta registrada durante los últimos 650 mil años. Las principales actividades antropogénicas que emiten CO₂ hacia la atmósfera son la quema de combustibles fósiles y de biomasa (Solomon *et al.*, 2007).

Para afrontar el fenómeno del cambio climático se han desarrollado diversas estrategias de mitigación las cuales tienen como meta la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Con base en el Protocolo de Kyoto, los países enlistados en el Anexo B están obligados a disminuir sus emisiones de gases de invernadero en al menos 5 % con respecto a las emisiones de 1990, en el periodo de compromiso comprendido entre 2008 y 2012 (CMNUCC, 1998). Si bien la reducción de emisiones directa por parte de las naciones ha sido complicada debido al cambio tecnológico y económico que esto representa, se han desarrollado otros mecanismos de mitigación, dentro de los cuales se encuentra el secuestro de carbono por parte de la biomasa vegetal.

A través del ciclo de vida de los organismos autótrofos, la biomasa producida a través de la fotosíntesis se transforma y puede llegar a alguno de los otros reservorios de carbono como son el suelo, los ecosistemas acuáticos y la atmósfera. Este ciclo del carbono es bastante complejo ya que la dinámica de los ecosistemas considera fenómenos locales y globales, además, disturbios naturales como erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, erosión geológica o fenómenos climatológicos mantienen en constante cambio el contenido de carbono en los diferentes componentes. Además de la variabilidad natural, las actividades antropogénicas juegan un papel importante en el contenido de carbono en los distintos reservorios (Acosta y Etchevers, 2005).

Dentro de los proyectos de secuestro de carbono se encuentra la estrategia REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Degradation), la cual surgió junto con el Plan de Acción Bali en la 13^{ava} Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Esta estrategia tiene por objetivo incluir políticas de acción e incentivos en temas relacionados con la reducción de emisiones de la deforestación y degradación de los bosques en países desarrollados (Parker *et al.*, 2008). La idea principal del proyecto REDD es incentivar económicamente a los propietarios de fincas que no deforesten sus predios.

Otro proyecto similar es la venta de créditos de carbono, el cual está conformado por los elementos fundamentales de todo mercado: la oferta y la demanda. Los actores principales en esta estrategia de mitigación son los “vendedores” de carbono que están conformados por países, estados o dueños de fincas que tienen superficies con cubierta vegetal que realizan el servicio ambiental de secuestro de carbono; por otra parte están los “compradores” de carbono que son países o empresas emisoras de gases de efecto invernadero. Por lo general existe un intermediario quien conecta a ambas partes para realizar la transacción, a los vendedores se les pagan las toneladas de carbono secuestrado en su terreno y a los compradores se les entregan los créditos de carbono que compró (Bull *et al.*, 2006).

Aunque México no se encuentra dentro de los países del Anexo B del Protocolo de Kyoto, en los últimos años ha logrado grandes avances en cuanto a la cuantificación de la línea base de carbono en los componentes biomasa, suelo, agua y atmósfera de

diversos ecosistemas, así como políticas y proyectos sectoriales que van encaminados a la mitigación de CO₂. Como ejemplos de estrategias de mitigación en el sector agrícola se encuentra la implementación de la agricultura de cero labranza, la cual puede mitigar 0.88 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹; la producción de biocombustibles dividida en producción de etanol de caña de azúcar, etanol de sorgo y biodiesel de la palma de aceite podría mitigar 11.2 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹, 1.6 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹ y 12 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹, respectivamente. En cuanto al sector forestal, algunas de las estrategias de mitigación propuestas son la reforestación y la restauración de bosques con una tasa de mitigación de 5 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹ y la forestación con 8.6 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹; además otras estrategias como el manejo forestal, la producción de carbón y la producción de electricidad a base de biomasa presentan tasas de mitigación de 0.9 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹, 2.5 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹ y 3.1 MtCO₂e ha⁻¹a⁻¹, respectivamente (Johnson *et al.*, 2010).

de Jong *et al.* (2009) elaboraron la cartografía a nivel nacional de la producción de biomasa en los ecosistemas de México, en donde se observa que las zonas con mayor producción de materia seca (> 195 MgMS ha⁻¹) son las selvas del sur de la Península de Yucatán, las partes altas de la Sierra Madre del Sur y de la Sierra de Chiapas, así como algunas áreas de la Sierra Volcánica Transversal en el centro del país. De forma más puntual Ordoñez *et al.* 2008 estimaron el contenido de carbono en la vegetación, hojarasca y el suelo bajo 10 diferentes usos de la tierra y tipos de vegetación en la región Purépecha de Michoacán. Los matorrales presentaron los menores contenidos de C (28.7 MgC ha⁻¹), posteriormente se encuentran las plantaciones de árboles y las huertas de aguacate con 50.5 MgC ha⁻¹ y 53.2 MgC ha⁻¹ respectivamente, y los restantes tipos de bosque registraron las mayores cantidades de carbono con valores entre 91.5 MgC ha⁻¹ (bosque de pino-encino) hasta 134.5 MgC ha⁻¹ (bosque de abeto).

De forma similar Gómez (2008) cuantificó el contenido de carbono en la biomasa aérea de seis especies correspondientes a los géneros *Quercus*, *Conzattia*, *Euphorbia*, *Ipomoea*, *Lysiloma* y *Acacia* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, Morelos. Para ello realizó un inventario florístico en distintos sitios de muestreo para obtener el índice de valor de importancia por cada especie y así identificar los árboles dominantes. Para las seis especies seleccionadas se crearon ecuaciones alométricas con el método

propuesto por Etchevers *et al.* (2005), las ecuaciones relacionan variables dasométricas como la altura total y el diámetro normal con el contenido de biomasa por componente (hojas, ramas, fuste, raíces). Como resultado Gómez (2008) encontró que los géneros *Lysiloma* y *Quercus* contienen mayor materia seca promedio por árbol (153 kg y 122 kg respectivamente).

Es por lo anterior que resulta imperante incrementar las investigaciones relacionadas a establecer la línea base del contenido de carbono en los diferentes componentes de los ecosistemas, especialmente en México, donde sus características biofísicas restringe la generalización de información y obliga a realizar estudios locales para obtener información confiable. De lo anterior se deriva el objetivo principal de la presente investigación, el cual fue cuantificar el contenido de carbono en la biomasa de los ecosistemas de la cuenca del Río Platanar.

Materiales y Métodos

Área de estudio. La cuenca del Río Platanar se ubica en la zona norte del estado de Chiapas, entre las coordenadas máximas 17° 37' 48" y 17° 21' 00" N; y 93° 28' 48" y 93° 08' 24" O. La cuenca se distribuye dentro del territorio de seis municipios: Sunuapa, Pichucalco, Ostucán, Juárez, Ixtacomitán y Chapultenango. La fisiografía de la cuenca se caracteriza por los sistemas de topoformas sierras, lomeríos y llanuras. La geología está conformada por rocas ígneas y sedimentarias, la arenisca del terciario es el tipo de roca que predomina con el 47 % del área de la cuenca. En cuanto a los tipos de suelo, INEGI (2002) reporta la presencia de 10 tipos, de los cuales el cambisol crómico es el que predomina con el 42 % del área total. El inventario nacional forestal (SEMARNAT-UNAM, 2001) establece que dentro de la cuenca se desarrolla la agricultura de temporal, el pastizal cultivado y la comunidad vegetal de selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria.

Delimitación de unidades de integración territorial. Las unidades de integración territorial (UIT) son unidades geográficas que conjugan los atributos de la fisiografía y el uso de la tierra (Monterroso *et al.*, 2009). El atributo fisiografía se cartografió con base

en la metodología del levantamiento fisiográfico propuesto por Ortiz (1984), para ello se manipuló el modelo digital de elevación (INEGI, 2009) utilizando el software ArcGIS^{MR} para obtener los límites geográficos de los sistemas terrestres que son unidades geográficas con paisajes similares. Para la cartografía de usos de la tierra y comunidades vegetales actualizado se fotointerpretaron imágenes satelitales Quickbird^{MR} en color verdadero del año 2008 con la ayuda del software ERDAS Imagine©, la asignación de los atributos de cada unidad delimitada se realizó con base en la información del inventario nacional forestal del año 2001 (SEMARNAT-UNAM, 2001). Posteriormente se realizó un recorrido de campo en Septiembre de 2009 para corregir y detallar la información de fisiografía y de los usos de la tierra y comunidades vegetales. Finalmente se sobrepusieron las coberturas temáticas para obtener los límites de las UIT.

Inventario florístico. Para obtener el inventario florístico se realizó un muestreo aleatorio dentro de las UIT de la cuenca. En cada sitio se establecieron parcelas cuadradas de 400 m² (20 m * 20 m) las cuales se georreferenciaron con un navegador GPS de la marca Garmin^{MR}. Dentro de cada parcela se obtuvo la especie y el nombre local, además de los atributos altura total, diámetro normal, frecuencia, densidad y cobertura de los individuos con forma biológica arbórea o arbustiva con diámetro normal mayor a 2.5 cm.

Índice de valor de importancia. Con la información obtenida en el inventario florístico se cuantificó el índice de valor de importancia (Ruíz y Fandiño, 2009) para cada especie de las comunidades vegetales identificadas con base en la siguiente expresión:

$$IVI = Fr + Dr + Der$$

donde, *IVI* es el índice de valor de importancia, *Fr* es la frecuencia relativa, *Dr* es la dominancia relativa y *Der* es la densidad relativa.

La frecuencia relativa se obtuvo mediante la ecuación:

$$Fr_i = \frac{m}{M} * 100$$

donde, Fr_i es la frecuencia relativa de la especie i respecto a la frecuencia total, m es la frecuencia de la especie i y M es la frecuencia total.

La dominancia relativa se obtuvo mediante la ecuación:

$$Dr_i = \frac{g}{G} * 100$$

donde, Dr_i es la dominancia relativa de la especie i respecto a la dominancia total, g es el área basal de la especie i , siendo G el área basal total.

La densidad relativa se obtuvo mediante la ecuación:

$$Der_i = \frac{n}{N} * 100$$

donde, Der_i es la densidad relativa de la especie i respecto a la densidad total, n es el número de individuos de la especie i y N el número total de individuos.

Determinación del carbono en la biomasa aérea .Con los resultados del índice de valor de importancia se identificaron las especies más representativas en cada uso de la tierra y comunidad vegetal. Para determinar el contenido de carbono en la biomasa aérea de las especies seleccionadas, se realizó una revisión bibliográfica para encontrar ecuaciones alométricas de cada especie que relacionan atributos dasométricos (altura, diámetro normal) con el contenido de biomasa (materia seca) por individuo. Una vez obtenido el valor de biomasa, éste se multiplicó por el factor de 0.5 con base en el supuesto teórico de que el 50 % de la biomasa total de las especies es carbono como lo establece el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Eggleston *et al.*, 2006). Finalmente se cuantificó la densidad de carbono por cada uso de la tierra mediante la siguiente ecuación:

$$DC = \sum_{i=1}^n (Ce_i * De_i)$$

donde, DC es la densidad de carbono en un determinado uso de la tierra ($MgC\ ha^{-1}$), Ce es el carbono por individuo (MgC), De es la densidad de individuos ($individuo\ ha^{-1}$) e i son las especies presentes por cada uso de la tierra.

La densidad de carbono resultante se incorporó a la base de datos de las unidades de integración territorial para obtener la cartografía del contenido de carbono arbóreo en la cuenca del Río Platanar.

Resultados y Discusión

Delimitación de unidades de integración territorial. Como resultado del levantamiento fisiográfico se delimitaron cuatro sistemas terrestres: Aparato Volcánico, Cañadas, Lomeríos y Planicie Aluvial. El sistema Lomeríos ocupa una superficie de 24,973.1 ha que corresponde al 58.8 % del área total de la cuenca, y presenta un intervalo altitudinal entre los 200 msnm a los 900 msnm. Se caracteriza por lomeríos ondulados de baja altitud que corresponden a la confluencia de la sierra con la planicie aluvial, en donde el 58.9% son terrenos de planos a inclinados, el 39.5% son terrenos moderadamente escarpados y solo el 1.5% corresponde a terrenos escarpados. En la orientación de la pendiente, el 59.6% corresponde a áreas que se calientan más ya sea porque reciben mayor energía o por el balance diario de energía, que son las orientaciones Sur, Sureste, Suroeste y Este. El 32.6% de la superficie de este Sistema corresponde a zonas que reciben menos energía o el balance diario de la misma calienta menos la superficie del terreno. En el Cuadro 8 se presentan las características de los cuatro sistemas delimitados.

En la delimitación de los usos de la tierra con base en imágenes satelitales Quickbird^{MR}, se encontraron ocho unidades en la cuenca: Áreas degradadas, Asentamientos humanos, Pastizales cultivados, Selva alta perennifolia con vegetación secundaria, Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria, Selva baja perennifolia con vegetación secundaria, Selva baja caducifolia con vegetación secundaria y zonas Sin vegetación aparente. Los Pastizales cultivados son el uso predominante en la cuenca ya que se distribuyen en 31,138.6 ha que equivalen al 73.3 % de la superficie total de la cuenca, el

ganado vacuno es quien se alimenta principalmente en estas zonas, aunque también se pueden encontrar otras especies como son cabras y fauna silvestre como venado cola blanca. Las Áreas degradadas se presentan principalmente en el sistema terrestre Cañadas y son el resultado del sobrepastoreo y el mal manejo de los pastizales. Aunque únicamente cubren el 0.5 % de la cuenca, es posible que a futuro se vaya incrementando esta superficie debido al sistema de explotación que actualmente se le da a las zonas de pastoreo, especialmente en los terrenos más vulnerables que son los que presentan mayor pendiente. La superficie ocupada por las comunidades vegetales de selva se distribuyó de la siguiente manera: la Selva alta perennifolia con vegetación secundaria presenta una superficie de 3,911.6 ha, la Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria 3,721.6 ha, la Selva baja perennifolia con vegetación secundaria 2,049.2 ha y la Selva baja caducifolia con vegetación secundaria 748.9 ha.

Cuadro 8. Características de los sistemas terrestres de la cuenca del Río Platanar

Sistema terrestre	Superficie (ha)	Intervalo altitudinal (msnm)	Forma del terreno	Geología	Aspecto dominante
Aparato Volcánico	433.7	600 – 1,300	Laderas moderadamente escarpadas a escarpadas	Derrames lávicos de naturaleza andesíticos y basálticos del cuaternario	Sur, sureste, suroeste y este
Cañadas	8,448.4	200 – 1,200	Laderas escarpadas y moderadamente escarpadas	Lutita y arenisca del terciario, caliza del cretácico y andesita y basalto del cuaternario	Sur, sureste, suroeste y este
Lomeríos	24,973.1	200 - 900	Lomeríos ondulados moderadamente escarpados	Arenisca del terciario, andesita y basalto del cuaternario y sedimentos aluviales del cuaternario	Sur, sureste, suroeste y este
Planicie Aluvial	8,590.3	< 200	Planicies	Sedimentos aluviales del cuaternario y arenisca del terciario	Sin aspecto

Las Áreas sin vegetación aparente se ubican en las laderas adyacentes al volcán Chichonal las cuales cubren el 1.4 % de la cuenca, los derrames lávicos y los depósitos de ceniza presentes en estas zonas impiden el desarrollo de vegetación de porte alto, por lo que únicamente se encuentran pocas especies pioneras de herbáceas y arbustos. Por su parte los Asentamientos humanos ocupan el 0.3 % de la cuenca, la población más grande encontrada es la cabecera municipal de Sunuapa que se ubica en la porción este de la cuenca.

La sobreposición de las coberturas fisiografía y usos de la tierra dio como resultado un total de 23 unidades de integración territorial (Figura 12). Las UIT resultantes con mayor superficie fueron Lomeríos con Pastizal cultivado con 19,572.2 ha y Planicie Aluvial con Pastizal cultivado con 6,085 ha.

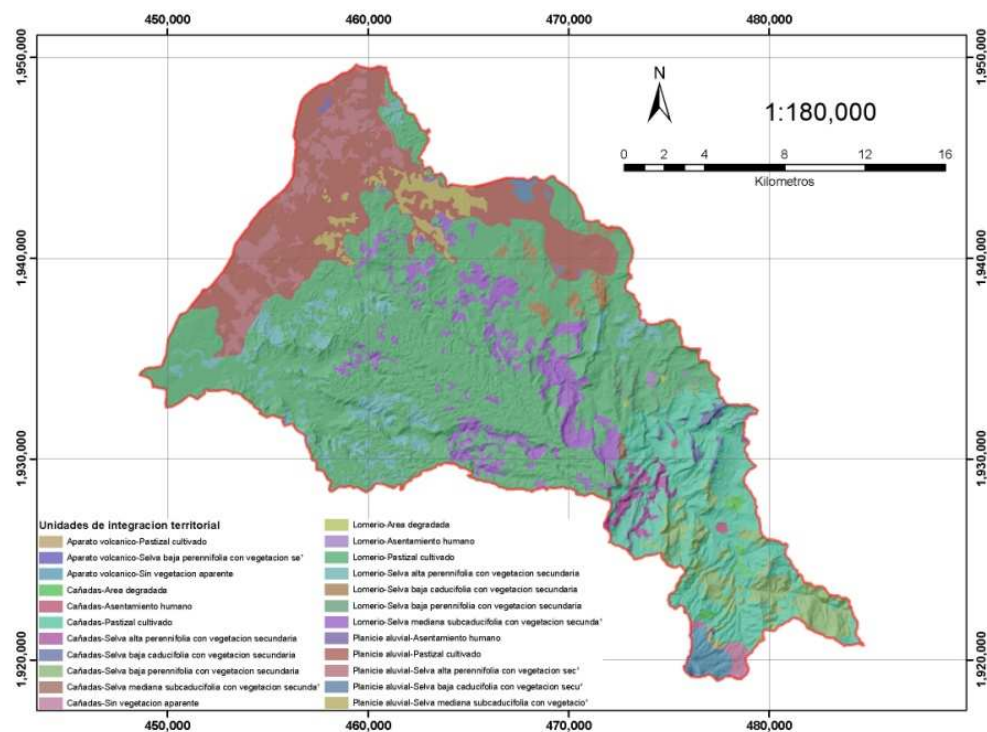


Figura 12. Unidades de integración territorial de la cuenca del Río Platanar

Inventario florístico. Para realizar el inventario florístico se establecieron 27 parcelas de muestreo (Figura 13). Se encontró un total de 53 especies conforma arbórea o arbustiva dentro de las cuatro comunidades vegetales. La comunidad Selva alta perennifolia con

vegetación secundaria presenta la mayor cantidad de especies con 36 especies, le siguen la Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria con 22 especies, la Selva baja perennifolia con 20 especies y por último la Selva baja caducifolia con vegetación secundaria con 12 especies.

La comunidad vegetal Selva Alta Perennifolia con Vegetación Secundaria (SAPvs) presenta su composición y estructura primaria muy alterada, se encuentra distribuida en pequeñas franjas o en terrenos abandonados de cultivo y entre plantaciones de cacao en forma de remanentes con algunos árboles mayores de 30 m. La estructura vertical de esta selva se compone de cuatro estratos, el estrato I o arbóreo superior presenta elementos mayores de 15 a 25 metros, dentro de los que destacan el canshán (*Terminalia amazonia*), el bari (*Callophyllum brasiliense*), amate y el ramón (*Brosimum alicastrum*). El segundo estrato (II) es el arbóreo inferior con plantas menores de 14 metros y hasta 5 m de altura, principalmente los escritos anteriormente junto con *Ficus* spp. (mata palo) y *Teobroma cacao* (cacao); el arbustivo o estrato III está formado por *Inga edulis* (cuajinicuili), algunos mezquites y huizaches junto con palma camedor (*Chamaedorea* spp.) y el helecho arborescente (*Cyathea mexicana*), el estrato IV o herbáceo lo componen especies de 1 a 3 metros de altura, en donde predominan los pastos forrajeros y la llamada hoja elegante (*Monstera* spp.), además de varias especies intolerantes.

De manera general, las especies con mayor densidad en la SAPvs son *Cordia alliodora* con 150 ind. ha⁻¹, *Cecropia obtusifolia*, *Guazuma ulmifolia* y *Hampea tomentosa* con 125 ind. ha⁻¹ cada una, y *Bursera simaruba*, *Lantana camara*, *Pimenta dioica* y *Solanum mammosum* con 100 ind. ha⁻¹ de cada especie.

En la Selva Baja Caducifolia con Vegetación Secundaria (SBCvs) predominan *Piper amalago* con 625 ind. ha⁻¹, *Salix humboldtiana* con 250 ind. ha⁻¹ y *Acacia glomerosa* con 125 ind. ha⁻¹. Esta comunidad se desarrolla principalmente en terrenos inundables que corren a lo largo del Río Platanar, en donde se observan escasos individuos de canacoite y dominan los sauces entre pastizales inducidos para uso ganadero. Se tienen dos estratos, el arbóreo de 3 a 8 metros (estrato I) con sauces, higerillas y algunos árboles de chipilcoite, mulato y tepehuaje (*Lysiloma acapulcensis*) y el herbáceo con

alturas de 0.1 a 0.50 m (estrato II), en donde dominan los pastos introducidos y algunas malezas de zonas inundables.

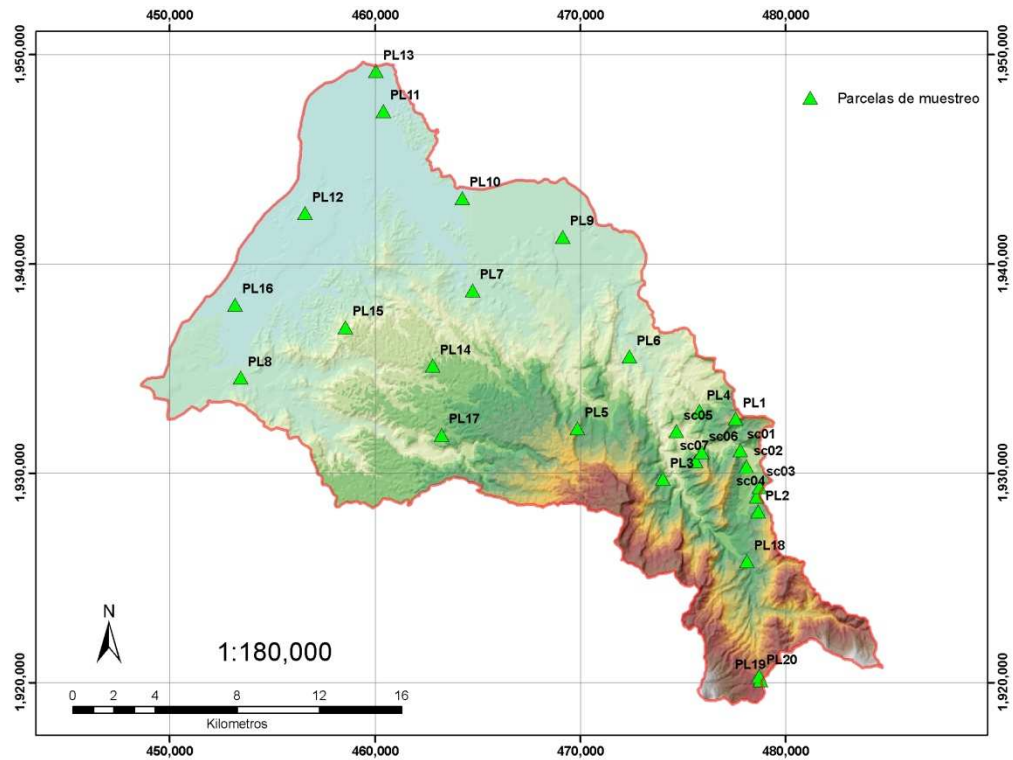


Figura 13. Ubicación de las parcelas de muestreo establecidas para realizar el inventario florístico

En lo que respecta a la Selva Baja Perennifolia con Vegetación Secundaria (SBPvs) son siete las especies con mayor densidad: *Cecropia obtusifolia* con 250 ind. ha⁻¹, *Lantana camara* y *Lippia myriocephala* con 200 ind. ha⁻¹ por especie, *Piper amalago* con 150 ind. ha⁻¹ y con 100 ind. ha⁻¹ se encuentran *Carica papaya*, *Conostegia xalapensis* y *Jacaratia mexicana*. Esta selva se desarrolla en las cercanías al volcán Chichonal en donde el tipo de roca es basalto. La estructura vertical de esta comunidad se compone de tres estratos, el arbóreo (2 a 4 metros) con dominancia del lolito (*Conostegia xalapensis*), cedro rojo (*Cedrela odorata*) y guarumo (*Cecropia obtusifolia*). En el estrato II o arbustivo se pueden encontrar arbustos de mirtos (*Salvia* spp.) y jarilla verde (*Senecio salignus*) y el estrato III o herbáceo con pastos y otras hierbas anuales.

La Selva Mediana Subcaducifolia con Vegetación Secundaria (SMSvs) es una comunidad derivada de la selva alta y mediana perennifolia pero algunas especies defolian durante un periodo corto de su ciclo anual, sobre todo en la floración como es el caso de *Cordia alliodora* y *Tabebuia chrysantas*. Las especies presentes son de menor tamaño (hasta 20 metros de altura) y se presentan en laderas con pendientes fuertes, en fondos de barrancas y cimas de montañas altas. Su composición vertical es de cuatro estratos, el primero o arbóreo de 10 a 20 metros de altura, presenta especies como el ramón (*Brosimum alicastrum*), amates (*Ficus* spp.), palo mulato (*Bursera simaruba*) y cacaíto (*Curatella americana*). En el estrato II o arbóreo inferior presenta elementos de 5 a 10 metros de altura, dentro de los que destacan el lombricillo (*Tabebuia chrysantha*), primavera (*Tabebuia donnell-smithii*), llora sangre (*Pterocarpus bayesii*) y tinco (*Vatairea lundellii*). En el estrato III a arbustivo, las plantas presentan una altura de 2 a 5 metros en donde se pueden encontrar el cacalosochitl (*Plemria rubra*), el chuchito (*Solanum mammosum*), entre otros. Para el estrato herbáceo el tamaño de la planta es de 0.30 a 2 metros, principalmente existen pastos, varios helechos y musáceas.

Los datos del inventario en la comunidad SMSvs reportan a las siguientes especies como las más representativas: *Guazuma ulmifolia* con 200 ind. ha⁻¹, *Cordia alliodora* y *Cyathea mexicana* con 150 ind. ha⁻¹, aunque esta última no es de forma biológica arbórea o arbustiva se tomó en cuenta para fines de esta investigación, *Bursera simaruba* y *Cecropia obtusifolia* con 125 ind. ha⁻¹ por cada especie y finalmente *Cochlospermum vitifolium* y *Pimenta dioica* presentan una densidad de 100 ind. ha⁻¹ cada una.

El Pastizal Cultivado (PC) es una comunidad con pocos árboles bajos de guamúchil, higuerilla y parota aislados, se emplean para dar sombra al ganado. En estos pastizales se mantienen dos estratos, el herbáceo superior de 0.70 a 3 metros principalmente de carrizos y pastos altos forrajeros con algunos arbustos tendidos como *Mimosa pigra*, y un estrato menor o herbáceo inferior de 0.10 a 0.60 m de altura dominado principalmente por el pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*).

Índice de valor de importancia. En el Cuadro 9 se presentan los valores de frecuencia relativa, densidad relativa, dominancia relativa y del índice de valor de importancia de

las especies con mayor densidad de individuos en las cuatro comunidades de selva encontradas en la cuenca.

En la comunidad SAPvs *Cordia alliodora* (20.2 %) registra el mayor peso ecológico junto con *Bursera simaruba* (19.6 %), debido principalmente por el diámetro del fuste registrado por estas especies lo que incrementa la dominancia relativa. Esta situación aporta evidencias de que si bien la estructura y composición primaria de esta comunidad está muy alterada, aún se pueden encontrar individuos de las especies clímax en los relictos de esta selva. Por su parte la comunidad SBCvs registra a *Piper amalago* con el 86.5 % del IVI y a *Salix humboldtiana* con 62.4 % como las especies de mayor importancia, debido a las condiciones decadentes de esta comunidad producto del aprovechamiento pecuario y que disminuye considerablemente la cantidad de especies nativas, ocasionando así la proliferación de arbustos pioneros como es el caso de *P. amalago* que registra valores altos de densidad relativa.

La comunidad SBPvs reporta al guarumo (*Cecropia obtusifolia*) como la especie de mayor importancia con IVI igual a 41.0 %. De forma similar a *C. alliodora* y *B. simaruba* en la comunidad SAPvs, es muy probable que los individuos de *C. obtusifolia* pertenezcan a la comunidad de selva original debido a elevada área basal registrada. Los arbustos *Lantana camara* y *Lippia myriocephala* se encuentran en segundo lugar de importancia con 23.2 % y se pueden catalogar como especies tolerantes que se encargan de colonizar el paisaje basáltico que predomina en este tipo de selva. Por último, en la SMSvs se identifica a *Guazuma ulmifolia* con 33.3 % del IVI y a *Bursera simaruba* con 30.6 % como las especies de mayor importancia ecológica. Este tipo de selva se puede catalogar como la más conservada en toda la cuenca debido a la densidad y dominancia de especies arbóreas como las antes mencionadas, además, de la presencia de helechos arbóreos (*Cyathea mexicana*), los cuales son una especie sensible a los cambios en la humedad del ambiente.

Determinación del carbono en la biomasa aérea. Las especies elegidas para la estimación de la biomasa en las diferentes comunidades vegetales fueron *Guazuma ulmifolia*, *Cecropia obtusifolia*, *Cordia alliodora*, *Bursera simaruba*, *Cedrela odorata* y *Salix humboldtiana*, estas especies fueron seleccionadas con base en el resultado del

índice de valor de importancia calculado previamente. Para estimar la cantidad de materia seca por individuo, se utilizaron las ecuaciones alométricas que se presentan en el Cuadro 10. Los valores de diámetro normal y altura de las especies se obtuvieron del inventario florístico, y los valores de gravedad específica para las especies *C. obtusifolia* ($p=0.36$) y *B. simaruba* ($p=0.33$), se extrajeron de las fichas técnicas de CONABIO (2009) y CONAFOR (2010).

La especie *G. ulmifolia* presenta la mayor cantidad de biomasa y de carbono en todas las comunidades vegetales ya que en la zona de estudio se encuentran individuos de porte alto ($H > 20$ m) y con diámetro normal superior a los 25 cm. En el Cuadro 11 se presenta la cantidad de biomasa y de carbono por individuo y por hectárea para las especies seleccionadas en cada comunidad vegetal. Para el caso de la comunidad de pastizal cultivado se utilizó el valor de 20 t MS ha^{-1} (Jiménez, 1989; Jaramillo *et al.*, 1990; Palma, 2006), que equivale a 10 MgC ha^{-1} al aplicar el factor de 0.5.

Con la cuantificación del contenido de carbono total por cada comunidad vegetal, se encontró que la selva alta perennifolia con vegetación secundaria registra la mayor cantidad de carbono por superficie (99.7 MgC ha^{-1}), seguida de la selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria en donde se reporta el valor de 91.9 MgC ha^{-1} . La distribución espacial del contenido de carbono por superficie en la cuenca se presenta en la Figura 14.

Conclusiones

La cuenca del Río Platanar se ubica en una de las zonas de mayor producción primaria neta en México, característica que le atribuye una tasa anual de captura de carbono alta.

Aunque se presenta una superficie elevada de perturbación en la condición natural de la cuenca, se pueden encontrar especies de forma biológica arbórea representativos de los ecosistemas nativos de la región como es el caso de *Cyathea mexicana*, *Brosimum alicastrum* y *Guazuma ulmifolia*.

Cuadro 9. Índice de valor de importancia de las especies con mayor densidad por comunidad vegetal

Comunidad Vegetal	Especie	Frecuencia relativa	Densidad relativa	Dominancia relativa	Índice de valor de importancia
Selva alta perennifolia con v.s. (SAPvs)	<i>Cordia alliodora</i>	3.1	6.8	10.3	20.2
	<i>Cecropia obtusifolia</i>	3.1	5.7	4.3	13.0
	<i>Guazuma ulmifolia</i>	3.1	5.7	8.6	17.3
	<i>Hampea tomentosa</i>	3.1	5.7	1.1	9.8
	<i>Bursera simaruba</i>	3.1	4.5	12.0	19.6
	<i>Lantana cámara</i>	3.1	4.5	0.9	8.5
	<i>Pimenta dioica</i>	1.9	4.5	7.7	14.2
	<i>Solanum mammosum</i>	3.1	4.5	0.9	8.5
Selva baja caducifolia con v.s. (SBCvs)	<i>Piper amalago</i>	8.7	43.9	33.9	86.5
	<i>Salix humboldtiana</i>	8.7	17.5	36.2	62.4
	<i>Acacia glomerosa</i>	8.7	8.8	9.0	26.5
	<i>Acacia pennatula</i>	8.7	3.5	1.8	14.0
	<i>Guazuma ulmifolia</i>	8.7	3.5	2.7	14.9
Selva baja perennifolia con v.s. (SBPvs)	<i>Cecropia obtusifolia</i>	6.1	14.5	20.4	41.0
	<i>Lantana camara</i>	6.1	11.6	5.4	23.2
	<i>Lippia myriosephala</i>	6.1	11.6	5.4	23.2
	<i>Piper amalago</i>	6.1	8.7	8.2	23.0
	<i>Carica papaya</i>	6.1	5.8	2.7	14.6
	<i>Conostegia xalapensis</i>	6.1	5.8	10.9	22.8
	<i>Jacaratia mexicana</i>	6.1	5.8	2.7	14.6
	<i>Cedrela odorata</i>	4.1	2.9	6.8	13.8
Selva mediana subcaducifolia con v.s. (SMSvs)	<i>Guazuma ulmifolia</i>	6.0	11.1	16.2	33.3
	<i>Cordia alliodora</i>	6.0	8.3	12.2	26.5
	<i>Cyathea mexicana</i>	6.0	8.3	4.6	18.9
	<i>Bursera simaruba</i>	6.0	6.9	17.7	30.6
	<i>Cecropia obtusifolia</i>	6.0	6.9	5.1	18.0
	<i>Cochlospermum vitifolium</i>	6.0	5.6	2.0	13.6
	<i>Pimenta dioica</i>	6.0	5.6	9.1	20.6
	<i>Plumeria rubra</i>	4.5	4.2	3.0	11.7

Cuadro 10. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de biomasa aérea

Especie	Ecuación	Fuente
<i>Guazuma ulmifolia</i>	$\text{Log}Y = -2.2 + 0.08\text{DN} - 0.00062\text{DN}^2$	Andrade e Ibrahim, 2003
<i>Cecropia obtusifolia</i>	$Y = \exp[-2.977 + \text{Ln}(pD^2H)]$	Chave <i>et al.</i> , 2003
<i>Cordia alliodora</i>	$Y = 10^{(-0.76 + 2.38 \log(\text{DN}))}$	Arce <i>et al.</i> , 2008
<i>Bursera simaruba</i>	$Y = \exp[-2.977 + \text{Ln}(pD^2H)]$	Chave <i>et al.</i> , 2003
<i>Cedrela odorata</i>	$Y = \exp[-2.289 + 2.649 \ln(\text{DN}) - 0.021(\ln(\text{DN}))^2]$	Penman <i>et al.</i> , 2003
<i>Salix humboldtiana</i>	$Y = 1.22 \text{ DN}^2 \text{ H } 10^{-2}$	UNFCCC, 2010

Y = biomasa (kgMS ind⁻¹), DN = diámetro normal (cm), H=altura (m), p=gravedad específica de la madera (g cm⁻³)

Cuadro 11. Contenido de biomasa y carbono por especie

Comunidad vegetal	Especie	Biomasa kgMS ind ⁻¹	Contenido de carbono MgC ind ⁻¹	MgC ha ⁻¹
SAPvs	<i>Guazuma ulmifolia</i>	852.6	0.4	53.4
SAPvs	<i>Cecropia obtusifolia</i>	236.6	0.1	14.9
SAPvs	<i>Cordia alliodora</i>	217.0	0.1	16.3
SAPvs	<i>Bursera simaruba</i>	302.6	0.2	15.1
SMSvs	<i>Guazuma ulmifolia</i>	699.1	0.3	69.9
SMSvs	<i>Cecropia obtusifolia</i>	124.7	0.1	7.8
SMSvs	<i>Bursera simaruba</i>	227.3	0.1	14.2
SBPvs	<i>Cedrela odorata</i>	283.7	0.1	7.1
SBPvs	<i>Cecropia obtusifolia</i>	105.9	0.1	13.2
SBCvs	<i>Salix humboldtiana</i>	109.8	0.1	13.7
SBCvs	<i>Guazuma ulmifolia</i>	640.1	0.3	16.0

En la comunidad selva alta perennifolia con vegetación secundaria se registra la mayor cantidad de carbono en la biomasa con poco menos de 100 MgC ha⁻¹. Por su parte el pastizal cultivado, que es la comunidad dominante, registra un contenido de carbono de 10 MgC ha⁻¹.

El actual aprovechamiento de los recursos naturales en la cuenca no es adecuado para las condiciones biofísicas de esta, ya que se identificaron zonas con una tasa elevada de

degradación en la cubierta vegetal, situación que disminuye el potencial de secuestro de carbono por parte de los ecosistemas de la cuenca.

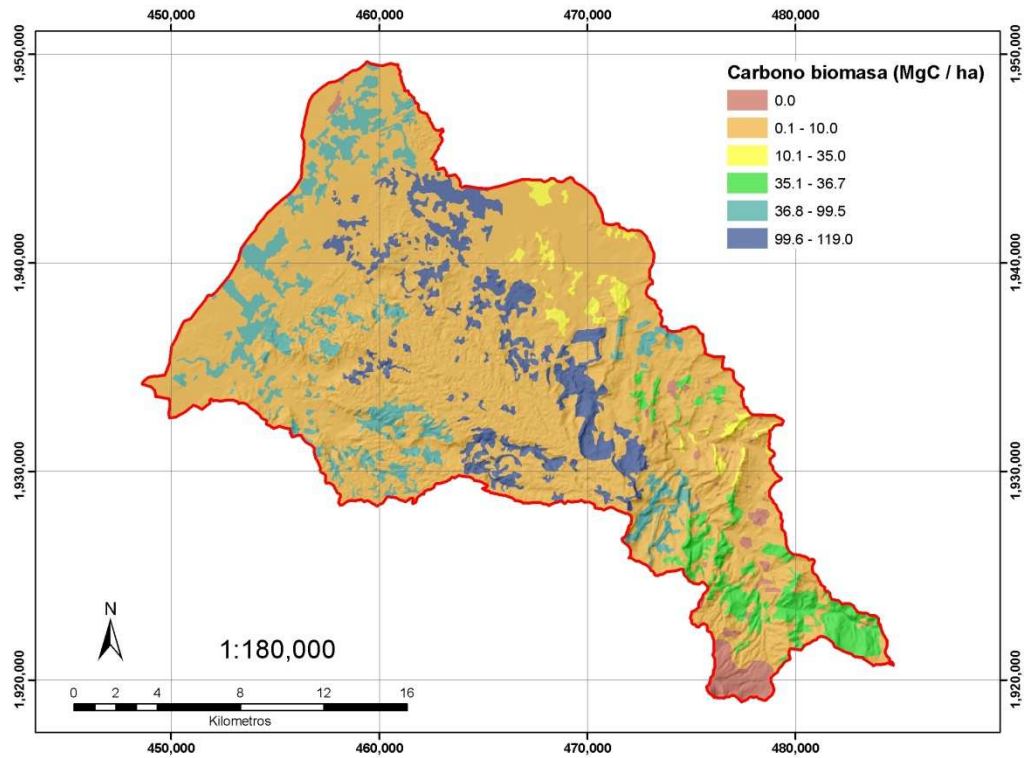


Figura 14. Contenido de carbono en la biomasa aérea en la cuenca del Río Platanar

Agradecimientos

Se agradece a la Comisión Nacional del Agua y a la Universidad Autónoma Chapingo por el financiamiento de la presente investigación a través del proyecto “Implementación de Acciones para el Manejo del Agua y Preservación del Suelo en Microcuencas Prioritarias de la parte Alta y Media de la Cuenca del Río Platanar, comprendida entre los estado de Tabasco y Chiapas” de acuerdo al convenio de colaboración No. SGIH-GDTT-UACH-010/06/RF/CC.

Literatura citada

- Acosta, M. y J.D. Etchevers. 2005. Los sumideros de carbono: una alternativa para el cobro de servicios ambientales. *En*: Benavides, J. de D., F. Becerra, T. Hernández, C. González y J.G. Flores (ed.). Contribución al estudio de los servicios ambientales. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. p. 129-142.
- Andrade, H.J. y M. Ibrahim. 2003. como monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles. *Agroforesteria en las Americas* 10(39-40):109-116
- Arce, N., E. Ortiz, M. Villalobos y S. Cordero. 2008. Existencias de carbono en charrales y sistemas agroforestales de cacao y banano de fincas indigenas bribri y cabecar de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 46(2008):30-33
- Bull, G., Z. Harkin y A. Wong. 2006. El desarrollo de mercados para el carbono forestal en la Columbia Británica, Canadá. *En*: Pagiola, S., J. Bishop y N. Landell (comp.). La venta de servicios ambientales forestales. Instituto Nacional de Ecología. México. p. 337-366.
- CICC. 2007. Estrategia nacional de cambio climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 163 pp.
- Chave, J., C. Andalo, s. Brown, M.A. Cairn, J.Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.P. Lescure, B.W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra y T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145:87-99
- CMNUCC. 1998. Protocolo de Kyoto. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Alemania. 25 pp.
- CONABIO. 2009. Sistema nacional de información sobre biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/ (15/03/2009)
- CONAFOR. 2010. Sistema de información para la reforestación. Comisión Nacional Forestal. Disponible en: http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=23&Itemid=24 (24/01/2010)

- de Jong, B.H.J., M. Olguín, V. Maldonado, F. Rojas, F. Paz, J. Etchevers, C.O. Cruz, J.A. Argumedo. 2009. Inventario Nacional de Emisiones de GEI en el sector uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura. Memorias del I Simposio Mexicano del Carbono. México. 2 pp.
- Eggleston, S., L. Buendía, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe (eds.). 2006. Agriculture, Forestry and Other Land Use. IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4. Editorial IGES. Japón. 673 pp.
- Etchevers, J.D., C.M. Monreal, C. Hidalgo, M. Acosta, J. Padilla y R.M. López. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 29 pp.
- Gómez, J.D. 2008. Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo de dos tipos de vegetación en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, Morelos, México. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados. México. 194 pp.
- INEGI. 2002. Unidades de suelo de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2009. Continuo de elevaciones mexicano. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. (cartografía digital).
- Jaramillo, V., G. Villegas, R. Méndez y D. Ríos. 1990. Coeficientes de agostadero de la República Mexicana. Consejo Técnico Consultivo para la Determinación de Coeficientes de Agostadero. México. (mapa impreso)
- Jiménez, A. 1989. La producción de forrajes en México. Universidad Autónoma Chapingo, Banco de México-FIRA. México. 100 pp.
- Johnson, T.M., C. Alatorre, Z. Romo y F. Liu. 2010. Low-carbon development for Mexico. The World Bank. E.U.A. 179 pp.
- López, D., L. Soto, G. Jimenez y S. Hernández. 2003. Relaciones alométricas para la predicción de biomasa forrajera y leña de *Acacia pennatula* y *Guazuma aulmifolia* en dos comunidades del norte de Chiapas, México. *Interciencia* 28(6):334-339
- Monterroso, A.I., J.D. Gómez, J.A. Tinoco, E. Betancourt y A. Reynoso. 2009. Propuesta de ordenamiento ecológico territorial considerando escenarios de cambio

- climático, caso de estudio en la Caldera de Huichapan, Hidalgo. *Espaciotiempo* 2(4):10-28
- Ordoñez, J.A., B.H. de Jong, F. García, F.L. Aviña, J.V. Pérez, G. Guerrero, R. Martínez y O. Masera. 2008. Carbon content vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the central Highlands of Michoacán, Mexico. *Forest Ecology and Management* 255(2008):2074-2084
- Ortiz, C.A. 1984. Metodología del levantamiento fisiográfico, un sistema de clasificación de tierras. Colegio de Postgraduados. México. 86 pp.
- Palma, J.M. 2006. Los sistemas silvopastoriles en el trópico mexicano. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal* 14(3):95-104
- Parker, C., A. Mitchell, M. Trivedi y N. Mardas. 2008. The REDD book. Global Canopy Programme. Inglaterra. 60 pp.
- Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendía. K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe y F. Wagner (ed.). 2003. Good practice guidance for land use, land use change and forestry. Intergovernmental Panel on climate Change. Japón. 622 pp.
- Ruíz, J. y M.C. Fandiño. 2009. Estado del bosque seco tropical e importancia relativa de su flora leñosa, Islas de la Vieja Providencia y Santa Catalina, Colombia, Caribe Suroccidental. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 33(126): 5-15
- SEMARNAT-UNAM. 2001. Inventario nacional forestal de México 2001 escala 250,000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Universidad Nacional Autónoma de México. México. (cartografía digital).
- Solomon, S., D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.). 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. Cambridge University Press. E.U.A. 996 pp.

UNFCCC. 2010. Clean development mechanism project design document form for afforestation and reforestation. United Nations Framework Convention on Climate Change. Alemania. 106 pp.

CAPÍTULO VI. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO PLATANAR, CHIAPAS²

Resumen

En la presente investigación se determinó el contenido de carbono orgánico en el suelo en la cuenca del Río Platanar ubicado en el norte del estado de Chiapas, México. Para ello se delimitaron unidades de integración territorial (UIT) las cuales conjugan los atributos de fisiografía y de uso de la tierra o comunidades vegetales presentes en el paisaje. Posteriormente se obtuvieron muestras simples de suelo en cada UIT a una profundidad de 30 cm, se abrieron cinco perfiles de suelo para poder clasificarlo además de tomar muestras para su análisis. Las determinaciones realizadas a las muestras fueron densidad aparente y porcentaje de materia orgánica, los cuales se utilizaron para estimar el contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) en cada UIT. Como resultado se observa que en las UIT ubicadas en los sistemas terrestres Lomeríos y Planicie Aluvial se registra la mayor cantidad de COS ($> 96.6 \text{ MgC ha}^{-1}$). En el sistema terrestre Cañadas se identificaron zonas degradadas en las que el contenido de COS es el más bajo en toda la cuenca ($< 7.2 \text{ MgC ha}^{-1}$), estas zonas desprovistas de vegetación pueden incrementar su superficie si no son rehabilitadas mediante prácticas de conservación.

Palabras clave: carbono orgánico en el suelo, línea base de carbono

Summary

The present research estimates the soil organic carbon (COS) content in basin Río Platanar, located in the north of Chiapas State. To do this, we obtain integration territorial units (ITU) merging the physiographic and land use attributes of landscape.

² Tinoco, J.A., J.D. Gómez, A.I. Monterroso, A. Vázquez, L. Krishnamurthy y C.A. Tavarez. Para ser enviado a Terra Latinoamericana

Next, soil samples were collected in each ITU at 30 cm deep; also, five soil profiles were opened to classify the soil and take samples. In laboratory the samples were analyzed and the data of bulk density and percent of organic matter were used to estimate the SOC content in each ITU. In the results it can be observed that the terrestrial systems Lomerios and Planicie Aluvial have the biggest content of COS ($> 96.6 \text{ MgC ha}^{-1}$). In the system Cañadas we can identify degraded areas with low COS content ($< 7.2 \text{ MgC ha}^{-1}$), these areas with no vegetation cover can suffer an increment in surface if they are not managed with soil conservation practice.

Index words: soil organic carbon, carbon base line

Introducción

El cambio climático por el que está atravesando actualmente el planeta es un fenómeno que se origina por el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, los GEI permiten el paso de la radiación de onda corta proveniente del espacio, pero al ser reflejada por la superficie terrestre es convertida en radiación de onda larga parte de la cual es absorbida y emitida de regreso a la Tierra por estos gases de invernadero, lo que conlleva a un incremento en la temperatura de la atmósfera (CICCC, 2007). El dióxido de carbono (CO_2) se ha considerado como el principal gas de invernadero debido a que sus emisiones son las más abundantes en comparación con los otros GEI, se estima que las concentraciones de CO_2 antes de la revolución industrial eran de 280 partes por millón (ppm), actualmente son de 380 ppm o 430 ppm si se considera a todos los GEI en términos de su equivalencia en CO_2 . Esta cifra es la concentración más alta registrada durante los últimos 650 mil años. Las principales actividades antropogénicas que emiten CO_2 hacia la atmósfera son la quema de combustibles fósiles y de biomasa (Solomon *et al.*, 2007).

Para afrontar el fenómeno del cambio climático se han desarrollado diversas estrategias de mitigación las cuales tienen como meta la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Con base en el Protocolo de Kyoto, los países enlistados en el Anexo B están obligados a disminuir sus emisiones de gases de invernadero en al menos 5 % con

respecto a las emisiones de 1990, en el periodo de compromiso comprendido entre 2008 y 2012 (CMNUCC, 1998). Si bien la reducción de emisiones directa por parte de las naciones ha sido complicada debido al cambio tecnológico y económico que esto representa, se han desarrollado otros mecanismos de mitigación, dentro de los cuales se encuentra el secuestro de carbono en el suelo.

Existen dos tipos de reservorios de carbono en el suelo: el orgánico (COS) y el inorgánico (CIS). El COS se presenta cerca de la superficie del suelo y hasta un metro de profundidad aproximadamente, se estima que el contenido de COS a nivel global es de 1,550 Pg (Pg = petagramos = 1×10^{15} gramos). Por su parte el CIS se encuentra en los horizontes más profundos (> 1 m), y está compuesto por carbono orgánico en forma de carbonato de calcio (CaCO_3) o también llamado caliche. El reservorio global de CIS se estima en aproximadamente 1,700 Pg de carbono (Lal *et al.*, 1995).

Para el caso de México, Balbontín *et al.* (2009) estimaron el contenido de carbono orgánico en el suelo a nivel nacional, para lo cual los autores utilizaron la red nacional de perfiles de suelo, el mapa edafológico escala 1:250,000, así como atributos del paisaje tales como la fisiografía y el uso de la tierra. Las zonas con mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo (300-1600 MgC ha^{-1}) se ubican en la Sierra Norte de Oaxaca, la Sierra Norte de Puebla, el sureste del estado de México y algunas partes de Chiapas y la Península de Yucatán. Por el contrario, gran parte de los suelos de la Península de Baja California reporta los valores más bajos de carbono orgánico (0.1-25 MgC ha^{-1}). De forma similar, Etchevers *et al.* (2010) estimaron el contenido de COS en las áreas agrícolas de México, y ubicaron a los estados de México, Yucatán, Michoacán, Veracruz y Chiapas como las entidades en donde se registra la mayor cantidad de COS con valores que oscilan entre 300 MgC ha^{-1} y 1,466 MgC ha^{-1} . En esta misma investigación se encontró que los Histosoles son los suelos que presentan la mayor cantidad de COS con 763.4 MgC ha^{-1} .

De forma más puntual, Saynes *et al.* (2005) cuantificaron, además de otras variables, el carbono total del suelo en diferentes estados de sucesión de un bosque en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, localizado en el estado de Morelos. Para ello realizaron muestreos en tres periodos distintos: seco (Marzo), inicio de lluvias (Junio) y a la mitad

de la temporada de lluvias (Septiembre) del año 2002. En cada periodo se colectaron cuatro núcleos de suelo aleatoriamente en cada sitio. Los resultados obtenidos muestran que la mayor cantidad de carbono en el suelo se presentó en la temporada seca del estado sucesional medio con $45.31 \text{ MgC ha}^{-1}$, por el contrario, en el mismo estado sucesional pero en la temporada de inicio de lluvias se reporta la menor cantidad de carbono con $31.69 \text{ MgC ha}^{-1}$. En la misma zona, Gómez (2008) determinó el contenido de carbono en el suelo en dos tipos de vegetación del área natural protegida (selva baja caducifolia y bosque de encino) de tres edades distintas (10, 20 y 40 años). El autor recolectó muestras de suelo a intervalos de 15 cm de espesor hasta llegar a los 90 cm o hasta la profundidad que el suelo lo permitiese. A cada muestra se le midió su densidad aparente y el carbono asociado al suelo mineral. Finalmente los resultados mostraron que el bosque de encino de 40 años de edad presenta mayor cantidad de carbono en el suelo con $147.6 \text{ MgC ha}^{-1}$, en contraparte, la selva baja caducifolia de 10 años registró la menor cantidad de carbono (11.3 MgC ha^{-1}).

En otra investigación, Covalada *et al.* (2006) evaluaron el efecto de las prácticas agrícolas sobre las características del carbono orgánico del suelo en Atécuaro, Michoacán. Par tal fin, se diseñaron cuatro parcelas experimentales de $1,000 \text{ m}^2$, las cuales fueron sometidas a cuatro sistemas de producción: sistema tradicional, tradicional mejorado, orgánico y barbecho. Cada tratamiento fue reproducido dos veces dividiendo cada parcela en dos subparcelas. Las muestras de suelo se tomaron a dos profundidades (0-10 cm y 10-20 cm), ya que el horizonte superficial se considera como el más afectado por las actividades antropogénicas. Los autores encontraron que el COS se incrementó significativamente con el manejo orgánico, por su parte el contenido de carbono en la fracción de partícula fina se incrementó con el manejo tradicional y orgánico. Otras investigaciones en donde se estima el contenido de carbono en el suelo en diferentes condiciones ambientales son las de González *et al.* (2008, González *et al.* (2010) y Pajares *et al.* (2010).

Lo antes expuesto refleja los esfuerzos que se están realizando en México para establecer la línea base de carbono, sin embargo, debido a la gran diversidad de ambientes que se pueden encontrar en el país es necesario incrementar los estudios

relacionados a los inventarios de carbono ya sea en el suelo, en la biomasa o en los ecosistemas acuáticos. Es por lo anterior que el objetivo principal de esta investigación fue determinar el contenido de carbono orgánico del suelo en los distintos usos de la tierra y condiciones fisiográficas de la cuenca del Río Platanar.

Materiales y Métodos

Área de estudio. La cuenca del Río Platanar se ubica en la zona norte del estado de Chiapas, entre las coordenadas máximas 17° 37' 48" y 17° 21' 00" N; y 93° 28' 48" y 93° 08' 24" O. La cuenca se distribuye dentro del territorio de seis municipios: Sunuapa, Pichucalco, Ostucán, Juárez, Ixtacomitán y Chapultenango. La fisiografía de la cuenca se caracteriza por los sistemas de topoformas sierras, lomeríos y llanuras. La geología está conformada por rocas ígneas y sedimentarias, la arenisca del terciario es el tipo de roca que predomina con el 47 % del área de la cuenca. En cuanto a los tipos de suelo, INEGI (2002) reporta la presencia de 10 tipos, de los cuales el cambisol crómico es el que predomina con el 42 % del área total. El inventario nacional forestal (SEMARNAT-UNAM, 2001) establece que dentro de la cuenca se desarrolla la agricultura de temporal, el pastizal cultivado y la comunidad vegetal de selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria.

Delimitación de unidades de integración territorial. Las unidades de integración territorial (UIT) son unidades geográficas que conjugan los atributos de la fisiografía y el uso de la tierra (Monterroso *et al.*, 2009). El atributo fisiografía se cartografió con base en la metodología del levantamiento fisiográfico propuesto por Ortiz (1984), para ello se manipuló el modelo digital de elevación (INEGI, 2009) utilizando el software ArcGIS^{MR} para obtener los límites geográficos de los sistemas terrestres que son unidades geográficas con paisajes similares. Para la cartografía de usos de la tierra y comunidades vegetales actualizado se fotointerpretaron imágenes satelitales Quickbird^{MR} en color verdadero del año 2008 con la ayuda del software ERDAS Imagine^{MR}, la asignación de los atributos de cada unidad delimitada se realizó con base en la información del inventario nacional forestal del año 2001 (SEMARNAT-UNAM, 2001). Posteriormente se realizó un recorrido de campo en Septiembre de 2009 para corregir y detallar la

información de fisiografía y de los usos de la tierra y comunidades vegetales. Finalmente se sobrepusieron las coberturas temáticas para obtener los límites de las UIT.

Muestreo y caracterización de suelo. Se colectaron muestras simples de suelo de manera aleatoria dentro de cada unidad de integración territorial. Las muestras se tomaron a una profundidad de 30 cm con una pala recta dentro de cuadrantes de 0.25 m², eliminando previamente la vegetación, hojarasca y mantillo en esta superficie; el suelo extraído se depositó en bolsas de polietileno rotuladas con la clave respectiva de la muestra. Para ubicar los sitios de muestreo dentro de la cuenca, se georeferenciaron con la ayuda de un receptor GPS marca Garmin^{MR} para posteriormente añadirlos al sistema de información geográfica. Aunado a las muestras simples, se abrieron perfiles de suelo representativos de los sistemas terrestres delimitados, en cada perfil se tomaron muestras de cada horizonte y se describió con base en la guía del Servicio para la Conservación de los Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (NRCS, 2009).

A las muestras colectadas se les determinaron los atributos de color, pH, textura, reacción al ácido clorhídrico, profundidad y límite inferior directamente en campo. Para obtener más información de los sitios de muestreo se levantó información de los atributos del paisaje como por ejemplo pendiente, topoformas, tipo de degradación, comunidades vegetales, tipo de aprovechamiento, geología, entre otros.

Las muestras de suelo fueron llevadas al laboratorio de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo para su análisis. Se determinaron los atributos de pH, contenido de materia orgánica, color en seco, color en húmedo, textura al tacto y densidad aparente. A las muestras de los perfiles de suelo también se les determinó la capacidad de intercambio catiónico, el porcentaje de saturación de bases, además de la concentración de calcio, potasio y sodio; así como su clasificación según la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO, 2006)

Determinación del carbono orgánico en el suelo. Para la estimación del porcentaje de carbono orgánico en cada muestra de suelo se utilizó el contenido de materia orgánica para alimentar a la siguiente ecuación.

$$\%C = \frac{\%MO}{1.72}$$

donde, $\%C$ es el porcentaje de carbono orgánico y $\%MO$ es el porcentaje de materia orgánica del suelo. Posteriormente se determinó el contenido de carbono orgánico en el suelo de cada muestra con base en la siguiente expresión.

$$COS = \%C * Dap * Pr$$

Donde, COS es el contenido de carbono orgánico en el suelo en $MgC\ ha^{-1}$, $\%C$ es el porcentaje de carbono orgánico, Dap es la densidad aparente en $g\ cm^{-3}$ y Pr es la profundidad de la muestra de suelo en cm.

Finalmente se obtuvo la distribución espacial del contenido de carbono orgánico en el suelo en la cuenca con base en el COS de cada una de las muestras colectadas, las cuales representan las condiciones de las diferentes unidades de integración territorial.

Resultados y Discusión

Delimitación de unidades de integración territorial. Como resultado del levantamiento fisiográfico se delimitaron cuatro sistemas terrestres: Aparato Volcánico, Cañadas, Lomeríos y Planicie Aluvial. El sistema Lomeríos ocupa una superficie de 24,973.1 ha que corresponde al 58.8 % del área total de la cuenca, y presenta un intervalo altitudinal entre los 200 msnm a los 900 msnm. Se caracteriza por lomeríos ondulados de baja altitud que corresponden a la confluencia de la sierra con la planicie aluvial, en donde el 58.9% son terrenos de planos a inclinados, el 39.5% son terrenos moderadamente escarpados y solo el 1.5% corresponde a terrenos escarpados. En la orientación de la pendiente, el 59.6% corresponde a áreas que se calientan más ya sea porque reciben mayor energía o por el balance diario de energía, que son las orientaciones Sur, Sureste, Suroeste y Este. El 32.6% de la superficie de este Sistema corresponde a zonas que

reciben menos energía o el balance diario de la misma caliente menos la superficie del terreno. En el Cuadro 12 se presentan las características de los cuatro sistemas delimitados.

En la delimitación de los usos de la tierra con base en imágenes satelitales Quickbird^{MR}, se encontraron ocho unidades en la cuenca: Áreas degradadas, Asentamientos humanos, Pastizales cultivados, Selva alta perennifolia con vegetación secundaria, Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria, Selva baja perennifolia con vegetación secundaria, Selva baja caducifolia con vegetación secundaria y zonas Sin vegetación aparente. Los Pastizales cultivados son el uso predominante en la cuenca ya que se distribuyen en 31,138.6 ha que equivalen al 73.3 % de la superficie total de la cuenca, el ganado vacuno es quien se alimenta principalmente en estas zonas, aunque también se pueden encontrar otras especies como son cabras y fauna silvestre como venado cola blanca.

Las Áreas degradadas se presentan principalmente en el sistema terrestre Cañadas y son el resultado del sobrepastoreo y el mal manejo de los pastizales. Aunque únicamente cubren el 0.5 % de la cuenca, es posible que a futuro se vaya incrementando esta superficie debido al sistema de explotación que actualmente se le da a las zonas de pastoreo, especialmente en los terrenos más vulnerables que son los que presentan mayor pendiente. La superficie ocupada por las comunidades vegetales de selva se distribuyó de la siguiente manera: la Selva alta perennifolia con vegetación secundaria presenta una superficie de 3,911.6 ha, la Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria 3,721.6 ha, la Selva baja perennifolia con vegetación secundaria 2,049.2 ha y la Selva baja caducifolia con vegetación secundaria 748.9 ha.

Las Áreas sin vegetación aparente se ubican en las laderas adyacentes al volcán Chichonal las cuales cubren el 1.4 % de la cuenca, los derrames lávicos y los depósitos de ceniza presentes en estas zonas impiden el desarrollo de vegetación de porte alto, por lo que únicamente se encuentran pocas especies pioneras de herbáceas y arbustos. Por su parte los Asentamientos humanos ocupan el 0.3 % de la cuenca, la población más grande encontrada es la cabecera municipal de Sunuapa que se ubica en la porción este de la cuenca.

Cuadro 12. Características de los sistemas terrestres de la cuenca del Río Platanar

Sistema terrestre	Superficie (ha)	Intervalo altitudinal (msnm)	Forma del terreno	Geología	Aspecto dominante
Aparato Volcánico (AV)	433.7	600 – 1,300	Laderas moderadamente escarpadas a escarpadas	Derrames lávicos de naturaleza andesíticos y basálticos del cuaternario	Sur, sureste, suroeste y este
Cañadas (C)	8,448.4	200 – 1,200	Laderas escarpadas y moderadamente escarpadas	Lutita y arenisca del terciario, caliza del cretácico y andesita y basalto del cuaternario	Sur, sureste, suroeste y este
Lomeríos (L)	24,973.1	200 - 900	Lomeríos ondulados moderadamente escarpados	Arenisca del terciario, andesita y basalto del cuaternario y sedimentos aluviales del cuaternario	Sur, sureste, suroeste y este
Planicie Aluvial (PA)	8,590.3	< 200	Planicies	Sedimentos aluviales del cuaternario y arenisca del terciario	Sin aspecto

La sobreposición de las coberturas fisiografía y usos de la tierra dio como resultado un total de 23 unidades de integración territorial (Figura 15). Las UIT resultantes con mayor superficie fueron Lomeríos con Pastizal cultivado con 19,572.2 ha y Planicie Aluvial con Pastizal cultivado con 6,085 ha.

Muestreo y caracterización de suelo. En total se obtuvieron 27 sitios de muestreo, en los que se incluyen cinco perfiles de suelo (Figura 16). El perfil de suelo ubicado en el sistema terrestre Aparato Volcánico (PL20) presenta como material parental a los depósitos de ceniza recientes de naturaleza intermedia en donde son apreciables el lapilli de piedra pómez en la capa inferior a los 58 cm. Solo los primeros 10 a 17 cm tienen evidencias de acumulación de materia orgánica como producto de la descomposición de las raíces de los pastos, el resto del material muestra las evidencias de las eyecciones volcánicas recientes del Chichonal. El suelo se clasifica de acuerdo a FAO (2006) como Arenosol tefrico en donde las características dominantes es su textura arenosa hasta una

profundidad superior a los 100 cm. En el sistema terrestre Cañadas se establecieron dos perfiles de suelo correspondientes a los sitios PL1 y PL2, en ambos se identificó que el material parental se constituye por depósitos de ceniza que cubren a derrames de brecha volcánica recientes de naturaleza intermedia que se ubican sobre depósitos de Arenisca y Lutita del terciario, en ambos sitios el tipo de suelo se clasifica como Acrisol húmico.

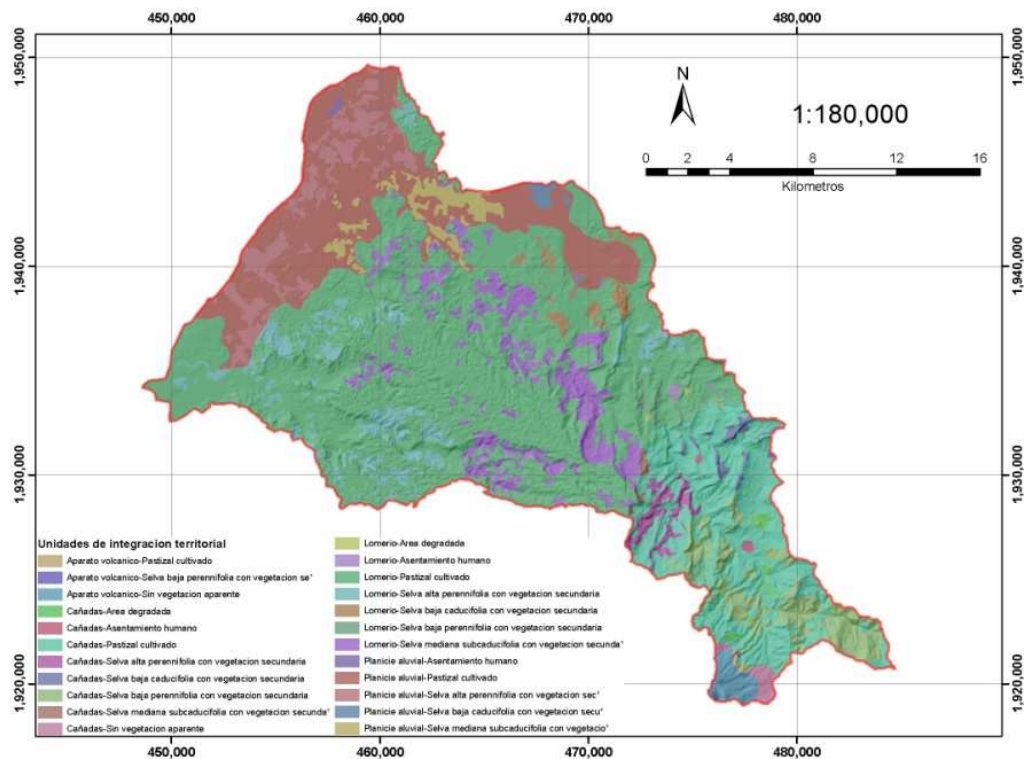


Figura 15. Unidades de integración territorial de la cuenca del Río Platanar

Con respecto al sistema terrestre Lomeríos, el perfil de suelo se ubica en el sitio PL14. Este perfil se clasifica como Acrisol crómico en donde el material parental está constituido por toba andesítica y brecha volcánica de la misma naturaleza. El perfil de suelo correspondiente al sistema terrestre Planicie Aluvial se ubica en el sitio PL12, en esta unidad el suelo se clasifica como Acrisol gleico-húmico. En el Cuadro 13 se presentan las características de los perfiles analizados.

Determinación del carbono orgánico en el suelo. El perfil de suelo del sistema terrestre Lomeríos es el que registra la mayor cantidad de porcentaje de carbono orgánico, en comparación con los otros perfiles, con un valor ponderado de 1.63 % a una profundidad de 145 cm. Este sitio es especialmente rico en carbono orgánico principalmente en su

horizonte más superficial (A1). En contraparte, el perfil del sistema terrestre Aparato Volcánico es en donde se registra la menor cantidad de carbono orgánico con un valor ponderado de 0.1 % a una profundidad de 110 cm., este comportamiento se asocia principalmente a la pendiente y al tipo de cobertura vegetal. El perfil del sistema Aparato Volcánico se ubica en un terreno de forma moderadamente escarpada y la cobertura vegetal es del tipo pastizal cultivado en donde se ubican especies de gramíneas de porte bajo y con un alto contenido de lignina en sus hojas, además, se pueden encontrar algunos árboles dispersos; otro factor importante es la ubicación de este sitio con respecto al volcán Chichonal, ya que se observa la presencia de depósitos de ceniza lo que genera la textura arenosa característica de esta zona. En el caso del perfil del sistema Lomeríos se ubica en terrenos con forma de lomeríos ondulados y la comunidad vegetal que se desarrolla es pastizal cultivado con el pasto estrella como especie dominante, la textura es arcillosa.

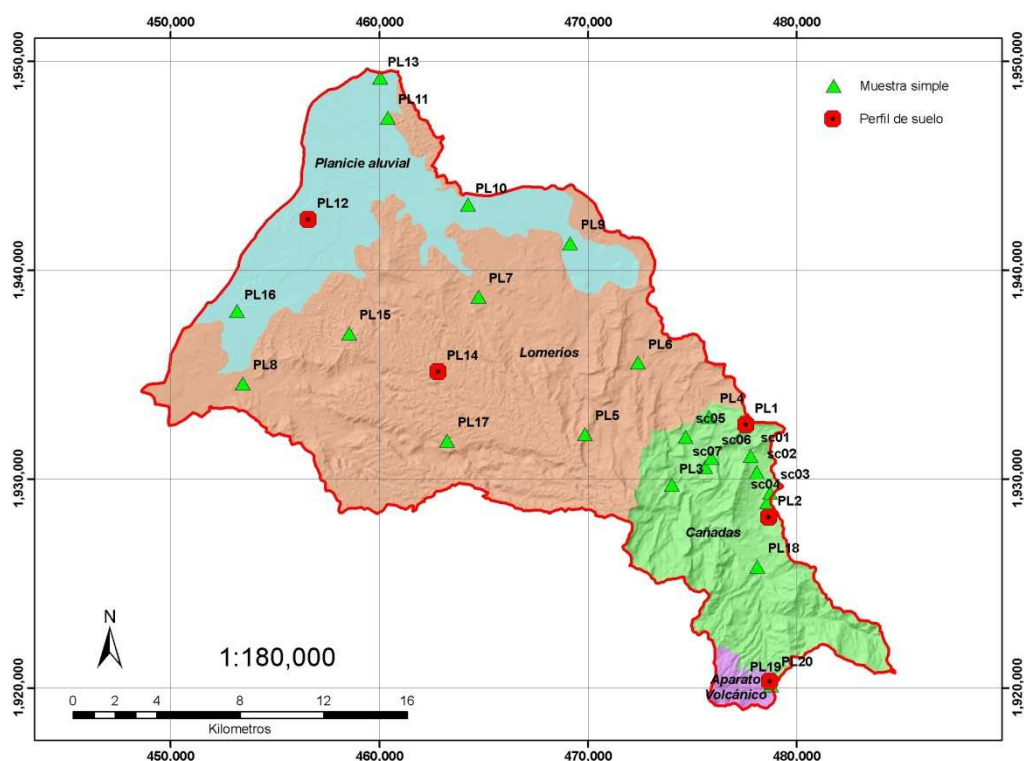


Figura 16. Ubicación de los sitios de muestreo de suelo

En la Figura 17 se presenta el comportamiento del carbono orgánico del suelo en los cinco perfiles analizados.

Cuadro 13. Características de los perfiles de suelo en la cuenca del Río Platanar

Sistema Terrestre	Sitio	Horizonte	Profundidad (cm)	Textura	Dap (g cm ⁻³)	MO (%)
Aparato Volcánico (AV)	PL20	Ap	0-17	Arena	1.51	0.45
		C1	17-58	Arena	1.56	0.22
		C2	58-110	Arena	1.61	0.0
		Oi	5-0	Materia orgánica con poco grado de descomposición		
	PL1	A	0-18	Arena francosa	1.23	4.3
		Bt1	18-52	Franco arcilloso	1.06	2.69
		Bt2	52-110	Arcillo limoso	1.27	0.45
Cañadas (C)		Oi	5-0	Materia orgánica asociado al pastizal con poco grado de descomposición		
		A1	0-13	Arena	1.28	2.47
	PL2	AC1	13-14	Arcilla arenosa	1.26	2.91
		AC2	14-46	Arena francosa	1.25	2.47
		AC3	46-60	Arena	1.31	1.34
		Btb	60-86	Arcillo limoso	1.6	0.22
Lomeríos (L)	PL14	A1	0-32	Franco arcilloso	1.20	5.83
		Bt1	32-76	Arcilla	1.44	1.79
		Bt2	76-116	Arcilla	1.44	0.67
		Cr	116-145	Arcilla	1.41	0.67
Planicie Aluvial (PA)	PL12	A1	0-17	Franco arcillo limoso	1.57	4.71
		AB	17-38	Arcillo limoso	1.64	1.12
		Bt1	38-74	Arcillo limoso	1.6	0.67
		Bt2	74-110	Arcillo limoso	1.58	0.22

Dap = densidad aparente, MO = materia orgánica

Al trasladar el carbono orgánico del suelo de los sitios de muestreo a las unidades de integración territorial se obtuvo la cartografía del COS en la cuenca. Se identifica a las UIT Planicie Aluvial con pastizal cultivado y Lomeríos con selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria como las de mayor contenido de COS (96.6 – 122.9 MgC ha⁻¹), las UIT Lomeríos con pastizal cultivado, Lomeríos con selva alta perennifolia con vegetación secundaria y Lomeríos con selva baja caducifolia con

vegetación secundaria se encuentran en una categoría menor de contenido de COS (54.1 – 96.6 MgC ha⁻¹). Las UIT localizadas en el sistema Aparato Volcánico así como las unidades que se ubican en las zonas degradadas registran la menor cantidad de COS con < 7.2 MgC ha⁻¹. En la Figura 18 se presenta la distribución espacial del contenido de carbono orgánico en el suelo en la cuenca.

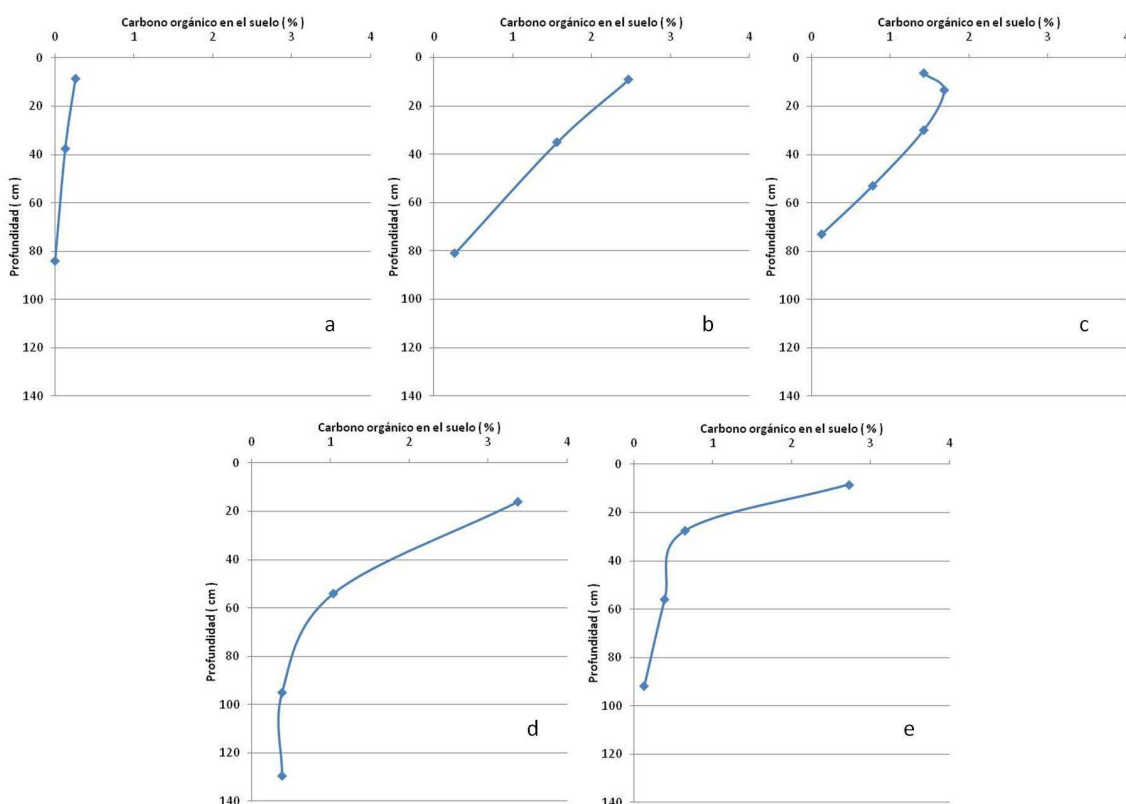


Figura 17. Comportamiento del carbono orgánico en el suelo en los perfiles analizados (a-Aparato Volcánico, b-Cañadas 1, c-Cañadas 2, d-Lomeríos, e-Planicie Aluvial)

Conclusiones

- El contenido de carbono orgánico en el suelo en la cuenca del Río Platanar está definido principalmente por el tipo de cobertura vegetal, la pendiente y la forma del terreno. La delimitación de unidades de integración territorial es una técnica que permite analizar el contenido de COS con base en atributos fisiográficos y de uso de la tierra.
- Los sistemas terrestres Lomeríos y Planicie Aluvial son las zonas de la cuenca con la mayor cantidad de carbono orgánico en el suelo por hectárea (> 96.6 MgC ha⁻¹).

- En la cuenca se identifican zonas con degradación de la cubierta vegetal en las cuales el contenido de carbono orgánico en el suelo es bajo ($< 7.2 \text{ MgC ha}^{-1}$) y por ende su fertilidad también, es imperante rehabilitar estas zonas para que no incrementen su superficie.

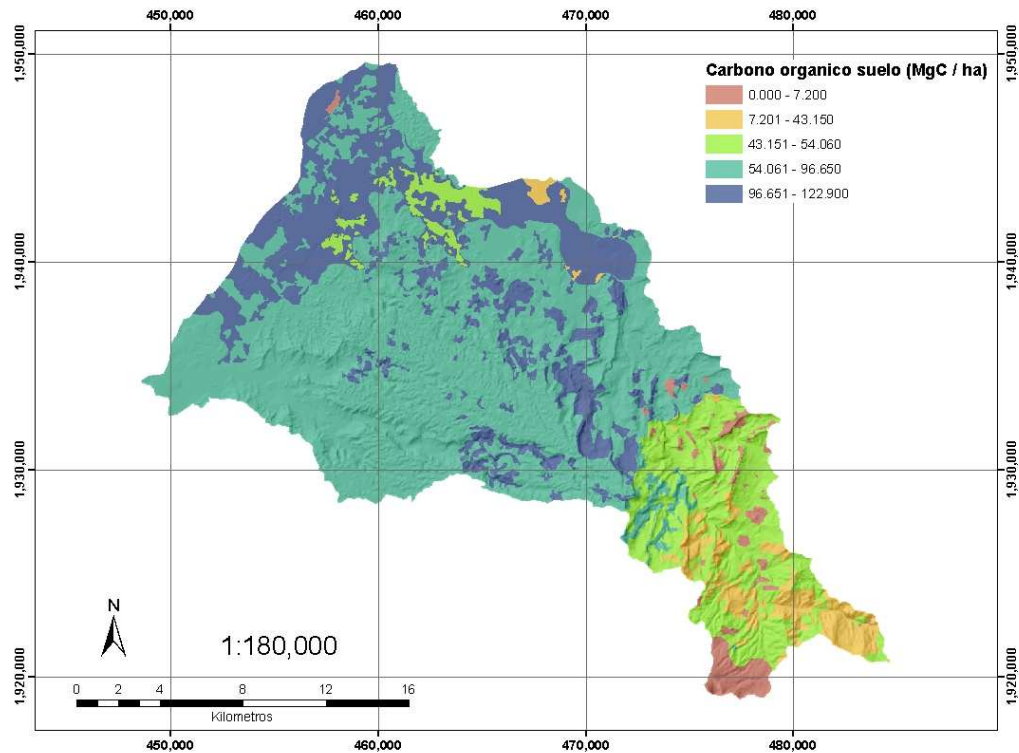


Figura 18. Contenido de carbono orgánico en el suelo en la cuenca del Río Platanar

Agradecimientos

Se agradece a la Comisión Nacional del Agua y a la Universidad Autónoma Chapingo por el financiamiento de la presente investigación a través del proyecto “Implementación de Acciones para el Manejo del Agua y Preservación del Suelo en Microcuencas Prioritarias de la parte Alta y Media de la Cuenca del Río Platanar, comprendida entre los estado de Tabasco y Chiapas” de acuerdo al convenio de colaboración No. SGIH-GDTT-UACH-010/06/RF/CC.

Literatura citada

- Balbontín, C., C.O. Cruz, F. Paz y Jorge Etchevers. 2009. Soil carbon sequestration in different ecoregions of Mexico. *En: Lal, R. y R.F. Follet. Soil carbon sequestration and the greenhouse effect. SSSA Special Publication 57. U.S.A. p. 71-96*
- CICC. 2007. Estrategia nacional de cambio climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 163 pp.
- CMNUCC. 1998. Protocolo de Kyoto. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Alemania. 25 pp.
- Covaleda, S., S. Pajares, J. Gallardo y J. Etchevers. 2006. Short-term changes in C and N distribution in soil particle-size fractions induced by agricultural practices in a cultivated volcanic soil from Mexico. *Organic Geochemistry 37(12):1943-1948*
- Etchevers, J.D., C.M. Monreal, C. Hidalgo, M. Acosta, J. Padilla y R.M. López. 2005. Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 29 pp.
- Etchevers, J.D., J.A. Tinoco, J.D. Gómez y A.I. Monterroso. 2010. Estimación del contenido de carbono orgánico en el suelo de las tierras agrícolas de México. *Memorias del II Simposio Mexicano del Carbono. México. 1 pp.*
- FAO. 2006. World reference base soil resources. World Soil Resources Reports No. 103. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Italia. 145 pp.
- Gómez, J.D. 2008. Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo de dos tipos de vegetación en la reserva de la biosfera “Sierra de Huautla”, Morelos, México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. México. 194 pp.
- González, L., J.D. Etchevers y C. Hidalgo. 2008. Carbono en suelos de ladera: factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia 42(7): 741-751*

- González, L., J.D. Etchevers, F. Paz, R. Váldez, J.M. González y E. C. Moreno. 2010. Estimation of changes in soil organic carbon in hillside systems on a regional scale. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12(2010): 57-67
- INEGI. 2002. Unidades de suelo de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2009. Continuo de elevaciones mexicano. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. (cartografía digital).
- Lal, R., J. Kimble, E. Levine y C. Withman. 1995. World soils and greenhouse effect: an overview. *En*: Lal, R., J. Kimble, E. Levine y B.A. Stewart (ed.). *Soils and global change*. Lewis Publishers. E.U.A. 440 pp.
- Monterroso, A.I., J.D. Gómez, J.A. Tinoco, E. Betancourt y A. Reynoso. 2009. Propuesta de ordenamiento ecológico territorial considerando escenarios de cambio climático, caso de estudio en la Caldera de Huichapan, Hidalgo. *Espaciotiempo* 2(4):10-28
- NRCS. 2009. Soil survey field and laboratory methods manual. National Soil Survey Center. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. E.U.A. 435 pp.
- Ortiz, C.A. 1984. Metodología del levantamiento fisiográfico, un sistema de clasificación de tierras. Colegio de Postgraduados. México. 86 pp.
- Pajares, S., J.E. Gallardo y J.D. Etchevers. 2010. Indicadores bioquímicos de un transecto altitudinal en el eje neovolcánico mexicano. *Agrociencia* 44(3): 261-274
- Saynes, V., C. Hidalgo, J. Etchevers y J. Campo. 2005. Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Applied Soil Ecology* 29:282-289
- SEMARNAT-UNAM. 2001. Inventario nacional forestal de México 2001 escala 250,000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Universidad Nacional Autónoma de México. México. (cartografía digital).
- Solomon, S., D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.). 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. Cambridge University Press. E.U.A. 996 pp.

CAPÍTULO VII. EVALUACIÓN DEL SERVICIO AMBIENTAL HIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL RÍO PLATANAR, CHIAPAS³

Resumen

En la presente investigación se cuantificó la recarga de agua hacia el subsuelo en la cuenca del Río Platanar, localizada en el norte de Chiapas, México. Para ello se delimitaron a escala regional las isotermas e isoyetas en la cuenca, posteriormente se realizó un balance de humedad en el suelo con el cual se obtuvieron variables hidrológicas como la evapotranspiración potencial y actual, el escurrimiento, el déficit de humedad, entre otras. Con estas variables se cuantificó la recarga de agua hacia el subsuelo. Como resultados principales se encontró que la zona Noroeste de la cuenca es en donde se registra la mayor lámina de agua infiltrada con un intervalo de 500 a 550 mm anuales, por el contrario las zonas con menor lámina infiltrada se ubican en el Sureste y presentan valores de 300 a 350 mm anuales. Se concluye que introduciendo sistemas productivos alternativos se podría incrementar el volumen de recarga de agua así como la viabilidad de que los habitantes de la cuenca reciban una compensación económica por la prestación de servicios ambientales hidrológicos.

PALABRAS CLAVE: balance de humedad, recarga de agua, escurrimiento, servicios ambientales

Abstract

In present research water recharge was quantified in Rio Platanar basin located in Chiapas State, Mexico. The methodology used begins with the regional delimitation of precipitation and temperature zones; a water balance was applied to obtain the hydrological variables: actual and potential evapotranspiration, runoff, water deficit and

³ Tinoco, J.A., J.D. Gómez, A.I. Monterroso, A. Vázquez, L. Krishnamurthy y C.A. Tavarez. Para ser enviado a Madera y Bosques

others. With these variables water recharge in basin was estimate. The main results show the northwest of basin as the principal infiltration area with annual values of 500 to 550 mm. The southeast of basin reports the lowest infiltration with 300 to 350 mm per year. It was concluded that alternative productive technologies could increment the water recharge volume and the possibility of economic payment to the people for the hydrologic environmental services.

KEY WORDS: water balance, water recharge, runoff, environmental services

Introducción

Los servicios ambientales o ecosistémicos son los beneficios intangibles que los diferentes ecosistemas ponen a disposición de la sociedad, ya sea de manera natural o por medio de su manejo sustentable. En consecuencia, la base de los servicios ambientales se halla en los componentes y procesos que integran los ecosistemas. Entre los principales servicios ambientales destacan: la regulación del clima y el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales, la provisión de agua en calidad y cantidad suficientes, la generación de oxígeno, el control de la erosión, la captura de carbono y la asimilación de diversos contaminantes, la protección de la biodiversidad, entre otros (SEMARNAT, 2003).

Durante las dos últimas décadas del siglo XX surgieron críticas realizadas desde una perspectiva ambientalista respecto del ingreso nacional per cápita como medida de desempeño económico. Esas críticas establecen que el ingreso nacional per cápita: (1) no tiene en cuenta el agotamiento de los recursos naturales, (2) no tiene en cuenta la degradación ambiental que afecta a los servicios ambientales de apoyo vital ni a los de esparcimiento; y (3) no incluye gastos defensivos para rectificar o prevenir la degradación ambiental (Common y Stagl, 2008). Es por esta razón que se ha iniciado un proceso para introducir a los servicios ambientales dentro de las cuentas nacionales, así como establecer mecanismos y metodologías para cuantificar monetariamente su valor.

Una de las estrategias que le otorga valor monetario a los servicios ecosistémicos es el pago de servicios ambientales (PSA), la cual se vislumbra como una herramienta para

prevenir la degradación de los ecosistemas y mejorar el bienestar humano. El PSA plantea que los propietarios de las tierras sean retribuidos por los servicios que éstas generan conciliando así sus intereses e incentivos con los de la sociedad que beneficia. Actualmente se están implementando a nivel internacional diversos esquemas de PSA, los cuales difieren en cuanto a la definición y clasificación de los servicios ambientales (Fregoso, 2006). En México, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) es quien ha establecido la legislación y los métodos de selección de las áreas sujetas a pago por servicios ambientales. Hoy en día se tienen registrados tres sistemas de PSA en el país a través del programa ProÁrbol: servicios ambientales hidrológicos, conservación de la biodiversidad, sistemas agroforestales con cultivos bajo sombra y secuestro de carbono (SEMARNAT, 2003).

La unidad física básica en la regulación del agua es la cuenca. Muchos de los patrones hídricos observados en una cuenca, al igual que la cantidad y calidad del agua que de ella emana, dependen de su relieve y pendiente, así como de su tamaño, ubicación geográfica, tipo de suelo y por supuesto del conjunto de los ecosistemas que la conforman. El papel de los bosques y selvas en la captación de agua es de primer orden ya que los múltiples estratos de vegetación interceptan el agua de lluvia de manera muy eficiente y la canalizan lentamente por hojas, ramas y troncos hacia el suelo, de manera que regulan el escurrimiento pluvial y evitan que el suelo se sature. A su vez, la densa hojarasca y suelos con un alto porcentaje de porosidad y materia orgánica característicos de estos ecosistemas actúan como esponjas para el agua de lluvia, permitiendo su lenta filtración hacia el subsuelo, la captación de agua adicional mediante la condensación de la neblina y un aumento en la recarga de los mantos acuíferos (SEMARNAT, 2003; Maderey y Jiménez, 2005).

La mayoría de las actividades humanas alteran la composición y estructura de los ecosistemas, y por lo consiguiente los procesos que generan servicios ambientales hidrológicos. Como ejemplo se tiene a la actividad agrícola, la cual introduce contaminantes originados por la aplicación de fertilizantes en los cauces de agua, la industria y las áreas urbanas hacen lo correspondiente mediante la deposición de desechos en los cuerpos de agua (Ongley, 1997; Brauman *et al.*, 2007). Sin embargo, el

cambio de uso de la tierra es el factor que más demerita la calidad y cantidad de los servicios hidrológicos a través de la infiltración y el escurrimiento.

Una de las ideas sobre la cual se basa el programa de pago por servicios ambientales hidrológicos en México es que la conservación de bosques y selvas favorece los procesos de filtrado, retención y almacenaje de agua, lo que incrementa la oferta de bienes y servicios relacionados. Al respecto, existe un acuerdo en que estos procesos dependen de factores que varían espacial y temporalmente como: la pendiente del sitio, las características del suelo, la composición y estructura de las comunidades vegetales, las variables climáticas, los regímenes de manejo, entre otros (Pérez *et al.*, 2006). Debido al elevado costo monetario y la cantidad de trabajo que se requiere para la obtención de las variables hidrológicas directamente en campo, usualmente se utilizan modelos para simular su comportamiento.

Actualmente existe una gran diversidad de estos modelos, los cuales son usualmente catalogados con base en la cantidad de insumos necesarios. Dentro de los más sencillos se encuentra el método racional que se aplica para estimar el volumen escurrido mediante la ecuación $V=Ce*Pp*A$, en donde V es el volumen medio que puede escurrir, Ce es el coeficiente de escurrimiento, Pp es la precipitación media anual y A es el área de la cuenca (Lucio, 2006). En contraparte existen otros modelos como el de Thornthwaite modificado versión III en donde se necesitan datos de temperatura media mensual, precipitación media mensual, capacidad de almacenaje de agua en el suelo y la latitud del sitio. Este modelo realiza un balance mensual de humedad en el suelo y como resultado reporta variables como la evapotranspiración potencial y actual, el déficit de humedad en el suelo, el almacenaje de humedad en el suelo, el escurrimiento, entre otras (Estrada Berg *et al.*, 2008).

Como ejemplo de la aplicación de los modelos para zonificar y cuantificar el servicio ambiental hidrológico se encuentra el estudio de Dionicio y Ramírez (2008), quienes evaluaron el comportamiento hidrográfico en microcuencas del noreste de Hidalgo donde se desarrolla el bosque mesófilo de montaña. Para la realización de la investigación se utilizó el balance hídrico evaluado con la siguiente expresión $Pt-(Int+ETP+Esc)=\Delta S$, donde Pt es la precipitación total, Int es la intercepción, ETP es la

evapotranspiración potencial, Esc es el escurrimiento y ΔS es el cambio en el almacenamiento de agua en el sistema. Derivado de la ecuación anterior los autores evaluaron el volumen de infiltración de la siguiente manera $\text{Infiltración} = P_t - (\text{Int} + \text{ETP} + \text{Esc})$. Como resultado encontraron que la precipitación total en el área de estudio es de 5,161.5 millones de m³ de los cuales el 12 % se infiltra abasteciendo al acuífero Atlapexco-Candelaria.

Otra investigación similar es la de Monterroso *et al.* (2009), quienes evaluaron los servicios ambientales hidrológicos del parque nacional El Chico, estado de Hidalgo. El modelo utilizado en este estudio fue el de Thornthwaite modificado versión III (Estrada Berg *et al.*, 2008). Como resultado encontraron que en la precipitación promedio anual en el parque es de 881.1 mm, de los cuales 132.1 mm son interceptados por la vegetación, 432.2 mm se evapotranspiran, 264.6 mm se escurren y 52.2 mm se infiltran. Los autores concluyen que los servicios ambientales hidrológicos que se generan en el parque son de gran importancia ya que alimentan al acuífero del cual se abastecen importantes zonas urbanas como por ejemplo Pachuca, la capital del Estado.

Es por lo anterior que el objetivo principal de la presente investigación fue estimar el volumen de recarga de agua hacia el subsuelo, entre otras variables hidrológicas, en la cuenca del Río Platanar.

Metodología

Área de estudio. La cuenca del Río Platanar se ubica en la zona norte del estado de Chiapas, entre las coordenadas máximas 17° 37' 48" y 17° 21' 00" N; y 93° 28' 48" y 93° 08' 24" O. La cuenca se distribuye dentro del territorio de seis municipios: Sunuapa, Pichucalco, Ostucán, Juárez, Ixtacomitán y Chapultenango. La fisiografía de la cuenca se caracteriza por los sistemas de topoformas sierras, lomeríos y llanuras. La geología está conformada por rocas ígneas y sedimentarias, la arenisca del terciario es el tipo de roca que predomina con el 47 % del área de la cuenca. En cuanto a los tipos de suelo, INEGI (2002) reporta la presencia de 10 tipos, de los cuales el cambisol crómico es el que predomina con el 42 % del área total. El inventario nacional forestal (SEMARNAT-

UNAM, 2001) establece que dentro de la cuenca se desarrolla la agricultura de temporal, el pastizal cultivado y la comunidad vegetal de selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria.

Delimitación detallada de variables climáticas. Para la búsqueda de información climática inicialmente se ubicaron las estaciones climatológicas que se encuentran dentro de los límites y en la periferia de la cuenca, posteriormente se utilizaron las normales climatológicas publicadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2000) para la extracción de los datos promedios mensuales y anual de precipitación y temperatura para el periodo de 1961-1990.

Para el trazo de las isoyetas se utilizó la metodología propuesta por Gómez *et al.* (2008), en la cual se emplea como información base a espaciomapas y/o imágenes de satélite, modelos digitales de elevación, cartas topográficas en formato digital y los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas. Utilizando el software de sistemas de información geográfica ArcGIS v.9.3^{MR} se sobrepusieron éstos productos cartográficos y se trazaron las Isolíneas de precipitación tomando en cuenta la dinámica de circulación de los vientos, el efecto que tiene los sistemas ortográficos en la dinámica de movimiento de los sistemas de vientos y su impacto en la precipitación, así como los diversos fenómenos meteorológicos que afectan a la zona de estudio como son Nortes y Huracanes (Vidal, 2005), estableciendo analogías entre la cantidad de precipitación y la distribución de la vegetación. Lo anterior para conformar el mapa de precipitación media anual y las precipitaciones mensuales.

Para obtener las isotermas se generaron modelos de regresión lineal simple para establecer el intervalo de variación de la temperatura con la altura, obteniéndose doce modelos mensuales y uno anual (Gómez *et al.*, 2008). Aplicando los modelos obtenidos se trazaron las isolíneas de temperatura por cada intervalo altitudinal, conformando así los doce mapas de temperatura mensual y el anual para la cuenca.

Finalmente se obtuvieron las áreas de influencia climática (AIC) al sobreponer las isoyetas con las isotermas anuales. A cada una de las AIC resultantes se le atribuyó su correspondiente base de datos de temperatura y precipitación mensual.

Balance de humedad. El balance de humedad se realizó utilizando la metodología de Thornthwaite y Matter (1957) modificada versión III (Estrada-Berg *et al.*, 2008). Esta modificación a la metodología fue creada en la década de los 90's por países de la Unión Europea para contar con mayor información del impacto del cambio climático en sus regiones, también, fue incorporada por la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación en Países Afectados por Sequía Grave y Desertificación, para delimitar las zonas áridas y semiáridas bajo un mismo criterio (Monterroso y Gómez, 2004). El sistema incluye la aplicación del concepto del balance hídrico mensual que consiste en la relación entre el agua aportada por la precipitación y la requerida por la vegetación a través de la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, que es la cantidad máxima de agua disponible en las capas del suelo ocupadas por las raíces y que puede ser tomada por las mismas cuando la planta lo requiera para realizar sus funciones. En su estimación se considera la cantidad de humedad a partir de la situación del punto de marchitez permanente hasta capacidad de campo. (Dunne y Leopold, 1978)

Para realizar el balance de agua, es necesario contar con información de la temperatura y la precipitación media mensual, así como las propiedades del suelo y el tipo de vegetación que se desarrolla para obtener la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo (CAP). El balance se inicia al calcular la Evapotranspiración potencial (ETP) que es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubra todo el terreno, cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada al suelo (Ortíz, 1987), el cálculo de la ETP por este método está en función de la temperatura media mensual y del índice de calor anual. Posteriormente se obtiene el Almacenaje de agua en el suelo (Al), para lo cual se utiliza la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo y la Pérdida potencial de agua acumulada (PPAA) que está en función de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial; Dunne y Leopold (1978) definen al almacenaje como la cantidad de agua que una determinada unidad de suelo es capaz de retener y que está disponible para las plantas, dependiendo de su textura y profundidad. El cálculo del almacenaje y condiciones para su obtención se realiza con base en la dinámica mensual de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, con lo cual se pueden encontrar las tres posibilidades siguientes:

$P - ETP > 0$ en todos los meses

$P - ETP < 0$ en todos los meses

$P - ETP > 0$ en algunos meses

Con los valores de almacenaje de agua en el suelo de cada mes se obtiene el Cambio de almacenaje de agua en el suelo (ΔAl), que es la diferencia entre el almacenaje de un determinado mes y el almacenaje del mes anterior. El Déficit de humedad (Def) se presenta cuando la precipitación es menor que la evapotranspiración potencial y se puede definir como la diferencia entre la cantidad de agua que potencialmente es posible que se pierda a la atmósfera y la cantidad de agua que realmente se pierde (Lucio, 2006). Posteriormente se procede a calcular la Evapotranspiración actual (ETA), la cual se calcula mediante la diferencia entre la evapotranspiración potencial y el déficit de humedad.

El siguiente parámetro a evaluar es la cantidad de Demasías de agua (Da) que se presentan cuando el almacenaje sobrepasa a la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo (CAP) y se calcula mediante la suma del almacenaje del mes anterior con la diferencia de $P-ETP$ y el resultado de resta a la CAP; se entiende como demasías a la lámina de agua producida por la precipitación pluvial que excede la capacidad máxima de retención de agua del suelo y que se convierte en escurrimiento. Para calcular la cantidad de escurrimientos en un mes determinado (Es), se utiliza la mitad de la suma en las demasías de agua presentes en dicho mes y los escurrimientos del mes anterior.

Estimación de la recarga de agua al subsuelo. El volumen de recarga de agua se estimó mediante la siguiente ecuación propuesta por Kumar (2003).

$$Ra = Pp - ETA + \Delta Al - Es$$

donde, Ra es la recarga de agua, ETA es la evapotranspiración actual, ΔAl es el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo y Es es el escurrimiento. La ecuación se introdujo en el manejador de base de datos del software ArcGIS v.9.3^{MR} para obtener la cartografía de la recarga de agua en la cuenca.

Resultados

Delimitación detallada de variables climáticas. Se utilizaron seis estaciones meteorológicas para la delimitación de las isoyetas e isotermas las cuales se enlistan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Estaciones meteorológicas en la zona de influencia de la cuenca del río Platanar

Nombre	Clave	Entidad	Latitud N	Longitud W	Altura (msnm)
Chapultenango	07032	Chiapas	17.33729	93.11878	699
Las Peñitas	07106	Chiapas	17.44385	93.45011	56
Pichucalco	07128	Chiapas	17.50802	93.11458	95
Platanar	07130	Chiapas	17.59024	93.38383	62
Sayula	07158	Chiapas	17.41667	93.38333	220
Mezcalapa	27032	Tabasco	17.63774	93.40246	40

Los intervalos de precipitación (Figura 19) están definidos por el impacto que tiene la orografía y la energía convectiva que se acentúa al alejarse los vientos provenientes del Golfo de México de la línea costera, en la circulación de los vientos asociados que provee de humedad a esta zona a lo largo del año, principalmente en la mitad caliente del año. La temporada más intensa de lluvias es en el verano, relacionada con la entrada de humedad proveniente del Golfo de México asociada a los vientos Alisios que de forma dominante tienen una dirección Noreste al Suroeste y a las ondas del este que generan un sistema de baja presión y de convergencia de vientos (Mosiño y Garcia, 1974; Vidal, 2005), dicha temporada comprende de la segunda quincena de abril, intensificándose en mayo continuando hasta la primera quincena de noviembre. La precipitación de la mitad fresca del año se asocia a la entrada de los frentes fríos a partir de octubre a abril. Es evidente la presencia de una pequeña canícula o sequía intraestival en la porción de menor altitud del área de estudio, que corresponde a una disminución en las lluvias en el mes de julio, la cual se asocia a la presencia de huracanes en el Golfo de México con trayectoria al Norte y Noreste que reducen la intensidad de los vientos alisios que entran al territorio nacional (Magaña *et al.*, 1999). La temporada de Huracanes se presenta desde junio hasta noviembre, y con la ocurrencia de estos

fenómenos se llegan a presentar lluvias torrenciales y de gran volumen, principalmente en los meses de septiembre y octubre que es cuando coincide la máxima incidencia de remanentes de huracanes y tormentas tropicales en la zona (Mosiño y García, 1974). Por las características orográficas es común que ocurran nieblas densas en las partes altas de la zona de estudio durante la temporada de lluvias.

De acuerdo con la metodología aplicada, el intervalo predominante de precipitación media anual en la zona de estudio va de 2,800 mm hasta los 4,400 mm con los valores menores en la parte norte de la cuenca que se ubica en la planicie y el gradiente de la misma aumenta hacia el sur asociado al aumento de la altitud y corresponde a las zonas de mayor altura que forzan a los vientos a ascender y enfriarse en las estribaciones de la sierra y con ello a descargar parte importante de su humedad.

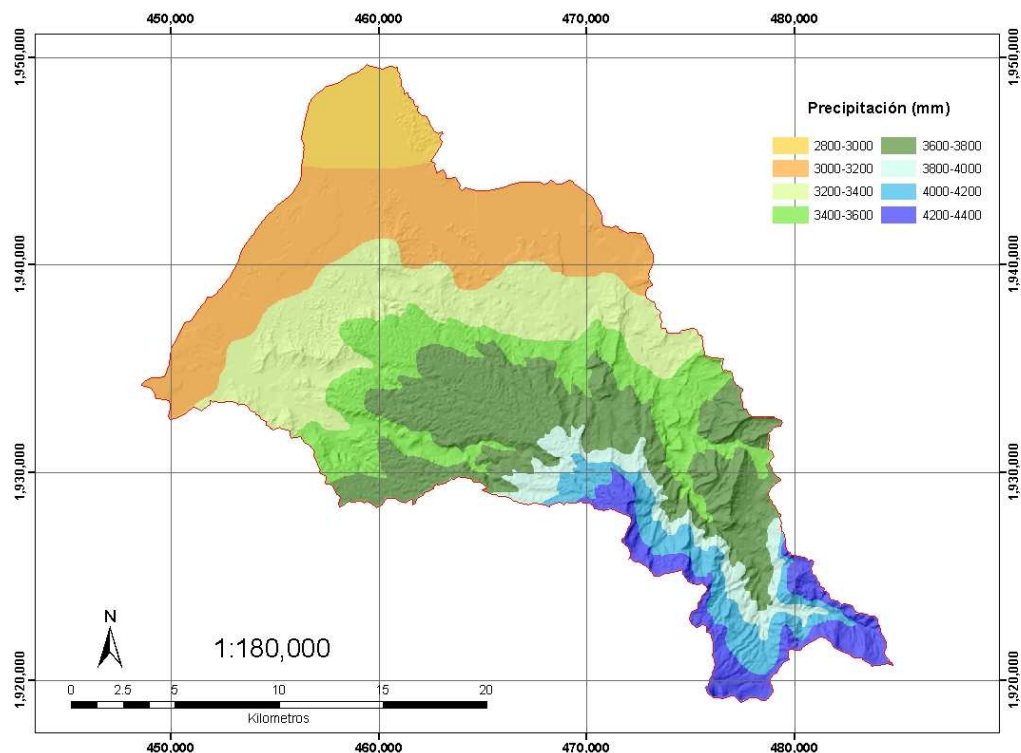


Figura 19. Precipitación media anual en la cuenca del Río Platanar

Con respecto a la temperatura media anual (Figura 20), en la zona de estudio se presenta un intervalo térmico desde los 20 °C a 21 °C en la parte más alta (1,200 a 1,300 msnm) que se ubica en la parte del cono del volcán Chichonal, hasta valores de 25 °C a 26 °C en las zonas de menos de los 500 msnm. Se tiene una baja oscilación térmica a lo largo

del año, con los meses más fríos en diciembre y enero y los más calientes en mayo y junio, esto debido a que en verano que corresponde a la parte del año en que se recibe mayor radiación, coincide con la temporada de lluvias por lo que una parte importante del tiempo está nublado, lo que refleja la radiación incidente y no llega a la superficie del terreno así que se mantienen las temperaturas sin gran cambio, haciendo a los climas del tipo isotermal.

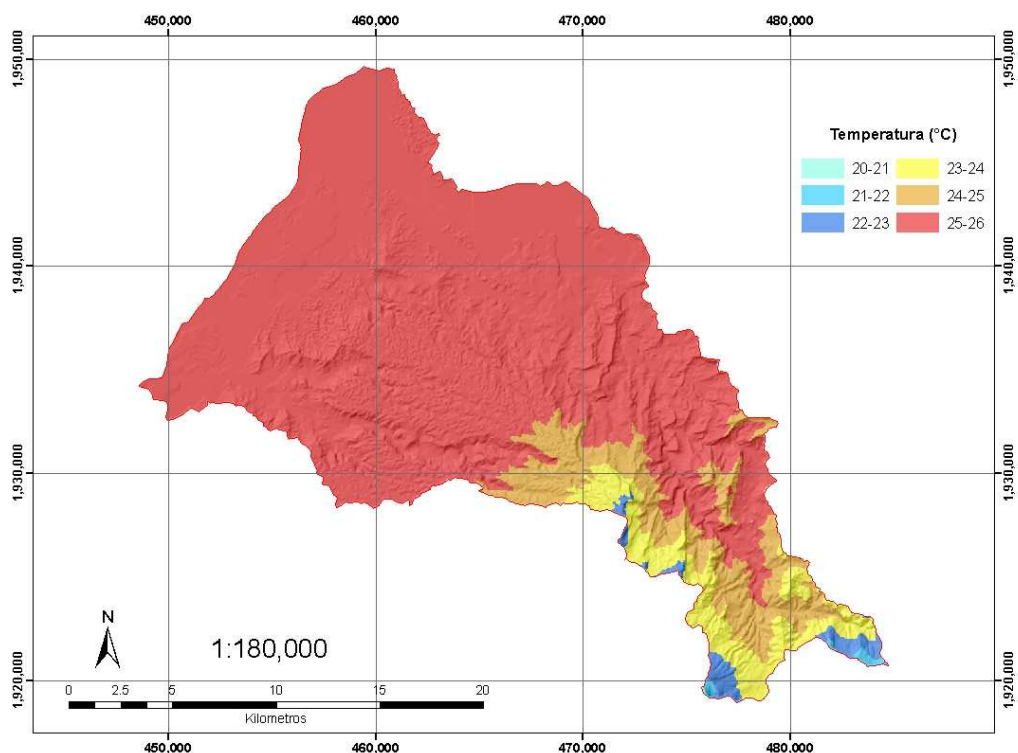


Figura 20. Temperatura media anual en la cuenca del Río Platanar

Balance de humedad. Los resultados del balance de humedad en la cuenca se presentan en la Figura 21, en donde se puede observar que la Evapotranspiración potencial supera a la Precipitación en solo dos meses (abril y mayo), sin embargo, se presenta un Déficit de humedad muy bajo (8.6 mm) en el periodo comprendido entre Marzo y Mayo. Aunque sea una cantidad muy baja en el Déficit de humedad, se observa que en este periodo de estiaje las plantas sufren ligeramente de estrés hídrico que repercute en su fenología, sin embargo, aun con la presencia de Déficit el periodo de crecimiento dura todo el año ya que la precipitación nunca llega a niveles inferiores que la mitad de la evapotranspiración potencial.

El mes más seco en la cuenca es Marzo con 118.7 mm de precipitación, esta lámina de lluvia se ve incrementada en Abril por la incidencia de los vientos alisios del noreste, este aporte de lluvia impide que el Déficit de humedad sea tan severo y las plantas puedan mantenerse perennes. A partir de Mayo la nubosidad generada por estos sistemas de vientos, produce una disminución en la radiación que llega a la superficie terrestre y por lo tanto un decremento en la Evapotranspiración, este fenómeno se ve acentuado con la presencia de huracanes a partir del mes de Agosto principalmente.

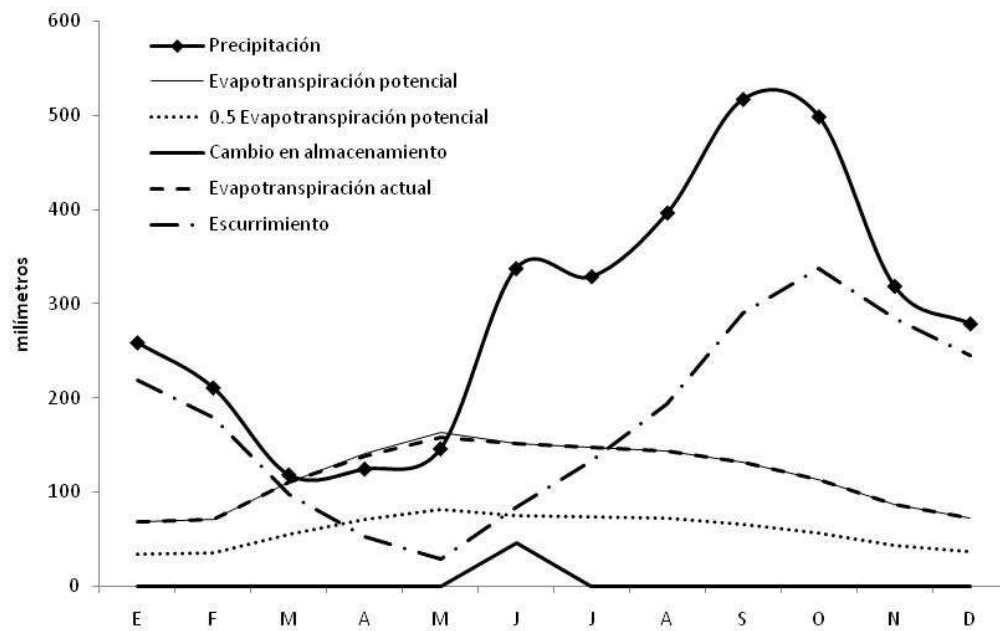


Figura 21. Balance hídrico mensual en la cuenca del Río Platanar

Los Ecurrimientos en la cuenca se presentan en todo el año y alcanzan una lámina total de 2,144.7 mm, estos flujos de agua tienen su valor más bajo en Mayo con 29.3 mm y a partir de este mes se ve incrementado su volumen gracias al aporte de precipitación de los vientos alisios y huracanes hasta llegar a su valor máximo en Octubre con 337.6 mm. Posterior a esta fecha se reduce el volumen escurrido por la disminución de la precipitación hasta el mes de Mayo. Estos Ecurrimientos superficiales alimentan a los cauces secundarios los cuales a su vez nutren al Río Platanar, gracias a lo cual se mantiene con líquido durante todo el año.

Estimación de la recarga de agua al subsuelo. La lámina promedio anual de recarga de agua en la cuenca asciende a 400.8 mm. El periodo en donde se presenta esta infiltración de agua hacia el subsuelo comprende cinco meses iniciando en Junio y terminando en el mes de Octubre. En la Figura 22 se presenta la distribución espacial de la recarga de agua anual en la cuenca, donde se puede apreciar que las zonas con mayor recarga se ubican en la zona Noroeste, en la desembocadura del río Platanar con una lámina de 500 a 550 mm anuales. Por el contrario la zona Sureste registra los valores más bajos con un estimado de 300 a 350 mm.

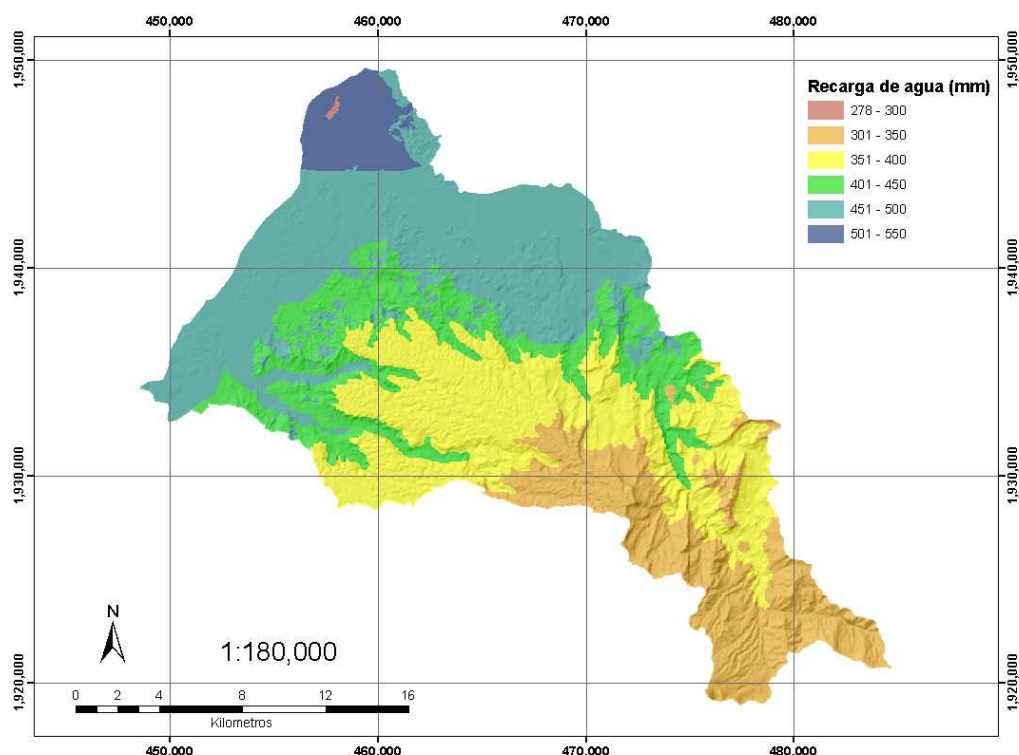


Figura 22. Recarga de agua anual en el subsuelo en la cuenca del Río Platanar

Discusión y Conclusiones

Delimitación detallada de variables climáticas. La cuenca del Río Platanar se encuentra en una de las zonas con mayor precipitación de todo el país. Gracias a su ubicación geográfica y a las condiciones orográficas, los vientos alisios y los huracanes llegan a la cuenca sin haber pasado anteriormente por otro sistema montañoso, aportando así un

volumen importante de precipitación. Al analizar la distribución anual de la precipitación, se observa que en los meses de verano es cuando se presenta la mayor cantidad de lluvia originada por los sistemas de vientos antes mencionados, por otra parte, en los meses invernales la precipitación recibida la aportan los frentes fríos provenientes de Canadá y los Estados Unidos de América. Aunado a lo anterior, la baja altitud en la que se encuentra la cuenca le permite poseer temperaturas promedio moderadas, en Enero con 21.7 °C como el mes más frío y a Mayo con 27.8 °C como el mes más caliente.

La metodología utilizada para el trazo de las isoyetas e isotermas es de gran utilidad especialmente por la topografía heterogénea que presenta la cuenca, atributo por el cual las interpolaciones (e.g. kriging) no son de utilidad ya que no toman en cuenta los factores orogénicos y altitudinales que determinan la distribución espacial de la precipitación y la temperatura. Aunado a lo anterior la presencia de pocas estaciones meteorológicas en la zona disminuye la confiabilidad de las interpolaciones automáticas.

Balance de humedad. Los valores promedio del balance de humedad en la cuenca se observa que de la precipitación recibida, aproximadamente el 35.3 % se pierde por evapotranspiración y el 57.3 % por escurrimientos. Los escurrimientos superficiales de agua se presentan durante todo el año y se registran principalmente en la zona Sur y Sureste en donde se observan las pendientes más pronunciadas, por el contrario la zona Noroeste de la cuenca al ser planicie aluvial el escurrimiento es menor. Los valores de evapotranspiración son relativamente bajos ya que la comunidad vegetal dominante es el pastizal cultivado, el cual no demanda una cantidad elevada de agua en comparación con el volumen de agua que requiere una selva perennifolia. Aunado a lo anterior la presencia de nubosidad en gran parte del año ayuda a disminuir la radiación solar y por ende la cantidad de agua transpirada y evaporada. Otro aspecto importante observado en el balance de humedad es que en la cuenca no se presentan valores ni periodos de déficit de humedad que afecten considerablemente a los procesos fisiológicos de las plantas y el periodo de crecimiento de los ecosistemas permanece constante todo el año.

La metodología del balance de humedad de Thornthwaite modificado permite conocer en detalle el movimiento del agua en el suelo, lo anterior no demerita importancia a las

observaciones realizadas directamente en campo con instrumentos de precisión para medir cada variable hidrológica, sin embargo, debido a la superficie ocupada y a la heterogeneidad de ambientes que se presentan en la cuenca, las metodologías como el balance de humedad de Thornthwaite auxilian en el estudio y análisis de dichas variables.

Estimación de la recarga de agua al subsuelo. La cuenca del Río Platanar es una fuente neta de recarga de agua hacia el subsuelo gracias a la cantidad de lluvia que recibe, especialmente en las zona Noroeste en donde las planicies permiten que el movimiento del agua sea más lento y por ende la infiltración se incrementa.

Cabe resaltar que los valores de recarga de agua en el subsuelo están íntimamente relacionados con el tipo de cobertura vegetal que se desarrolla, una cobertura densa como son los bosques o las selvas generan más estabilidad en las variables hidrológicas, y se esperaría que presentaran más volumen infiltrado y evapotranspirado; por el contrario se esperaría una menor cantidad de agua en forma de escurrimiento y de déficit hídrico. En la parte centro-sur de la cuenca se identificaron áreas con problemas de degradación en la cobertura vegetal y en las cuales se incrementa el escurrimiento y se disminuye la infiltración, es necesario establecer prácticas de conservación del suelo en estas zonas para poder rehabilitarlas y así evitar que el servicio hidrológico de recarga de agua se vea afectado.

Aún con el volumen de agua infiltrada en la cuenca, la gran mayoría de la cuenca no estaría sujeta a apoyos por parte del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológico (PSAH) de la Comisión Nacional Forestal, ya que el pastizal cultivado es la cobertura vegetal dominante en la cuenca, y el PSAH solo apoya a los terrenos con coberturas de bosque o selva, los cuales ocupan menos del 40 % en la cuenca. De lo anterior se deriva la necesidad de plantear sistemas productivos alternativos que permitan recobrar en la medida de lo posible la vegetación natural de la cuenca y al mismo tiempo ofrecer una fuente de ingreso económico a los habitantes de las comunidades.

Agradecimientos

Se agradece a la Comisión Nacional del Agua y a la Universidad Autónoma Chapingo por el financiamiento de la presente investigación a través del proyecto “Implementación de Acciones para el Manejo del Agua y Preservación del Suelo en Microcuencas Prioritarias de la parte Alta y Media de la Cuenca del Río Platanar, comprendida entre los estado de Tabasco y Chiapas” de acuerdo al convenio de colaboración No. SGIH-GDTT-UACH-010/06/RF/CC.

Referencias

- Brauman, K.A., G.C. Daily, T.K. Duarte y H.A. Mooney. 2007. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environmental and Resources* 32: 6.1-6.32
- Common, M. y S. Stagl. 2008. *Introducción a la economía ecológica*. Editorial Reverté. España. 562 pp.
- Dionicio, I. y X. Ramírez. 2008. *Comportamiento hidrográfico en el bosque mesófilo de montaña de la región noreste de Hidalgo para potenciar servicios ambientales hidrológicos*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. México. 129 pp.
- Dunne, T. y L. Leopold. 1978. *Water in environmental planning*. Editorial W.H. Freeman. E.U.A. 818 pp.
- Estrada Berg, J.B., J.D. Gómez, J.W. Estrada Berg, A.I. Monterroso y J.A. Tinoco. 2008. *El cambio climático en la República Mexicana, aplicaciones metodológicas en el manejo de suelos*. Universidad Autónoma Chapingo. México. 134 pp.
- Fregoso, A. 2006. La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. *Gaceta Ecológica* 78:29-46
- Gómez, J.D., J. Etchevers, A. Monterroso, C. Gay, J. Campo y M. Martínez. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21(1): 35-56
- INEGI. 2002. *Unidades de suelo de la República Mexicana*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. (cartografía digital).

- Kumar, C.P. 2003. Estimation of ground water recharge using soil moisture balance approach. *Journal of Soil and Water Conservation*. Soil Conservation Society of India 2(2):53-58
- Lucio, M. 2006. Estimación de balances de humedad para la cuenca Amajac bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. México. 139 pp.
- Maderey, L.E. y A. Jiménez. 2005. Principios de hidrogeografía, estudio del ciclo hidrológico. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 102 pp.
- Magaña, V., J.L. Pérez, J.L. Vázquez, E. Carrisoza y J. Pérez. 1999. El Niño y el clima. *En: Magaña, V. Los impactos del Niño en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. p. 23-68
- Monterroso, A.I. y J.D. Gómez. 2004. Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático. Comisión Nacional de Zonas Áridas y Universidad Autónoma Chapingo. México. 170 pp.
- Monterroso, A.I., C. Conde, J.D. Gómez, C. Gay y J.A. Tinoco. 2009. Evaluación café-agua frente a escenarios de cambio climático, caso de estudio en Veracruz, México. *Revista Electrónica de la Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas* 1(5): 29-36
- Mosiño, P.A. y E. García, 1974. The climate of Mexico. *En: Bryson, R.A. y F. K. Hare (ed.). World Survey of Climatology Vol. II*. Elsevier. E.U.A. p. 373-404.
- Ongley, E.D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Italia. 115 pp.
- Ortiz, C.A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. Universidad Autónoma Chapingo. 327 pp.
- Pérez, O., C. Delfín, A. Fregoso, H. Cotler y M. Equihua. 2006. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hidrológicos. *Gaceta Ecológica* 78: 47-66
- SEMARNAT. 2003. Introducción a los servicios ambientales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 71 pp.
- SEMARNAT-UNAM. 2001. Inventario nacional forestal de México 2001 escala 250,000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Universidad Nacional Autónoma de México. México. (cartografía digital).

- SMN. 2009. Normales climatológicas de la República Mexicana. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=23&Itemid=75 (21/Enero/2009)
- Thornthwaite, C.W. y J.R. Matter. 1957. Intructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Laboratory of Climatology 10: 181-311
- Vidal, R. 2005. Las regiones climáticas de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 213 pp.

CAPÍTULO VIII. EL ORDENAMIENTO AGROFORESTAL COMO UNA ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO: CASO DE ESTUDIO CUENCA DEL RÍO PLATANAR, CHIAPAS⁴

Resumen

Se presenta una metodología para el establecimiento de tecnologías agroforestales con base en características e indicadores de diagnóstico del paisaje. Se consideró a la cuenca del Río Platanar como zona piloto para probar esta técnica. Para ello se elaboró la cartografía detallada de los atributos pendiente, cobertura vegetal, temperatura, precipitación y características del suelo. De forma similar se evaluaron los indicadores de diagnóstico erosión hídrica, calidad ecológica, fragilidad natural, zonas riparias y condición actual de la vegetación. Con la cartografía obtenida se desarrolló un sistema de información geográfica para posteriormente aplicar una evaluación multicriterio y proponer tecnologías agroforestales en cada una de las unidades geográficas resultantes. Como resultado se obtuvieron nueve sistemas agroforestales, de los cuales el sistema árboles dispersos en potreros es el que abarca la mayor superficie con el 25.5 % de la superficie total de la cuenca. Se considera que las tecnologías agroforestales propuestas son opciones viables para la mitigación y adaptación al cambio climático ya que se incrementaría el carbono en la parte aérea y subterránea, y a su vez se diversificarían los productos para autoconsumo o para la venta por parte de los habitantes de la cuenca.

Palabras clave Planificación agroforestal, mitigación, adaptación, desarrollo sostenible

⁴ Tinoco, J.A., J.D. Gómez, A.I. Monterroso, A. Vázquez, L. Krishnamurthy y C.A. Tavarez. Para ser enviado a *Agroforestry Systems*

Abstract

In the present research a methodology to design agroforestry technologies was created considering landscape attributes and indicators. The basin Rio Platanar was the study area to apply this technique. It was obtained detail cartography of the attributes slope, actual land use, temperature, precipitation and soil properties. Also five indicators was evaluated rainfall erosion, ecological quality, riparian zones and actual vegetation condition. With these products a geographical information system was created to analyze them with a multi-criteria evaluation and proposed agroforestry technologies in each geographic unit. As results we obtain nine agroforestry systems, which trees scattered in a pasture is the dominant system with 25.5 % of the basin area. The proposed systems were considering as climate change mitigation and adaptation strategies, because the carbon in above and belowground could increment, and the population could have more diversification of products to consume or selling.

Keywords Agroforestry planning, mitigation, adaptation, sustainable development

Introducción

Actualmente se está iniciando un nuevo periodo de cambio climático, aunque a diferencia de los registrados en eras pasadas, se presenta por efecto de las actividades del humano (Rivera, 1999). Este cambio climático antropogénico se origina por la creciente concentración de gases de efecto invernadero y aerosoles (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆) en la atmósfera, lo que provoca el incremento de la temperatura mundial. Los GEI producen el efecto invernadero en la atmósfera ya que dejan pasar la radiación solar de onda corta proveniente del espacio, pero al ser reflejada por la superficie terrestre se convierte en radiación de onda larga (infrarroja) y los GEI de la atmósfera absorben parte de esta radiación calentándola. Este efecto invernadero es de suma importancia para el desarrollo de la vida en el planeta, ya que sin la presencia de éste la temperatura promedio del planeta sería de -15 °C aproximadamente. Sin embargo, una elevada y abrupta concentración de GEI conducen a un calentamiento global. El proceso de contaminación atmosférica mundial ha hecho que las concentraciones de CO₂ pasen de

280 ppm antes de la revolución industrial, a más de 380 ppm en la actualidad, o bien a 430 ppm si se considera a todos los GEI en términos de su equivalencia en dióxido de carbono lo que representa la más alta concentración registrada durante los últimos 650 mil años. Las principales actividades que liberan GEI a la atmósfera son la quema de combustibles fósiles y de biomasa, incendios forestales, el cultivo de arroz, la producción pecuaria, residuos sólidos urbanos, uso de fertilizantes, refrigerantes industriales, aparatos de aire acondicionado, la actividad petroquímica, entre otros (CICC, 2007; Solomon *et al.*, 2007).

Desde la década de 1990 se han propuesto y desarrollado diversas estrategias y acciones para disminuirlo o mitigar el cambio climático, así como para sobrellevarlo o adaptarse a los cambios venideros. Conceptualmente se entiende a la mitigación como “*la intervención antropogénica para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero*” (Torres *et al.*, 2008). El documento internacional de mayor importancia que estipula los lineamientos para la mitigación del cambio climático es el Protocolo de Kyoto. En este documento se establece por cada país enlistado en el Anexo B, el porcentaje de reducción de emisiones de GEI enlistados en el Anexo A; esta reducción se deberá llevar a cabo en el periodo de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012 (CMNUCC, 1998). Si bien algunos países han realizado esfuerzos para disminuir sus emisiones de GEI, algunos otros han decidido desconocer el Protocolo y no firmar los compromisos acordados. Aun así el IPCC reporta que los estudios realizados, tanto desde una perspectiva ascendente como descendente, indican que hay un alto nivel de coincidencia y abundante evidencia de que existe un potencial económico sustancial de mitigación de las emisiones mundiales de GEI en los próximos decenios, que podría contrarrestar el crecimiento proyectado de las emisiones mundiales o reducir estas por debajo de los niveles actuales (IPCC, 2007).

Por su parte la adaptación al fenómeno del cambio climático se conceptualiza como “*el ajuste de los sistemas humanos o naturales frente al cambio climático, con la finalidad de reducir la vulnerabilidad de las poblaciones humanas, minimizar daños y aprovechar los posibles beneficios de las nuevas condiciones climáticas*”, la capacidad adaptativa de los países está íntimamente relacionada con el desarrollo social y económico, aunque se

haya desigualmente distribuida tanto entre las sociedades como en el interior de estas (Parry *et al.*, 2007; Torres *et al.*, 2008). El interés y apoyo para el desarrollo e implementación de estrategias de adaptación es más reciente en comparación con las estrategias de mitigación, un avance importante en el reconocimiento de la importancia de la adaptación al cambio climático se dio con la Declaración Delhi de la octava sesión (COP 8) de la conferencia de las partes del CMNUCC en 2002 (Kandji *et al.*, 2006). A partir de la COP 8 se han planteado diversas opciones de adaptación al cambio climático, aunque en su mayoría son muy generales y son pocos los países que las están ajustando e implementando dentro de sus sociedades.

Uno de los sistemas de producción que se ha propuesto como estrategia de mitigación así como de adaptación es la agroforestería, la cual se define como el establecimiento deliberado de árboles y/o arbustos de uso múltiple en combinación con cultivos agrícolas y/o con especies animales (Nair, 1997; Krishnamurthy *et al.*, 2003). Como estrategia de mitigación, la agroforestería juega un papel importante ya que el núcleo de cualquier diseño agroforestal es el desarrollo de leñosas en el mismo espacio, y en ocasiones en el mismo tiempo, que cultivos y/o animales. Esta característica de la agroforestería le permite incrementar el secuestro de carbono y almacenarlo en la parte aérea y subterránea de los agroecosistemas, a una tasa mayor en comparación del sistema de producción monocultivo. Kandji *et al.* (2006) establece intervalo aproximados del potencial de almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de diferentes eco-regiones del mundo. La eco-región tropical húmeda alta de Norteamérica bajo el sistema silvopastoril registra la mayor cantidad de carbono a razón de 133-154 MgC ha⁻¹, en contraparte, la eco-región tropical húmeda baja del norte de Asia registra la menor tasa con 15-18 MgC ha⁻¹. Nair *et al.* (2009) estudiaron el secuestro de carbono en el suelo bajo diferentes sistemas agroforestales en cinco países, las unidades estudiadas fueron sistemas silvopastoriles en Estados Unidos, España, Brasil, huertos caseros multiespecies en India, cultivos intercalados y barreras vivas en Malí, y cacao de sombra en Brasil. Como resultado encontraron que los sistemas que están basados en árboles almacenan significativamente mayor cantidad de carbono en horizontes del suelo profundos en comparación con los sistemas que carecen de árboles en su diseño;

además, encontraron que el contenido de carbono en el suelo se incrementa conforme más cerca esté el sitio de muestra de árboles.

Gracias a la diversidad de especies que se cultivan en una determinada superficie y a las relaciones interespecíficas que se persiguen en la agroforestería se ha considerado a este sistema de producción como una estrategia de adaptación al cambio climático, ya que estas interacciones conllevan a una mayor estabilidad en las condiciones del agroecosistema. Algunos ejemplos de estas interacciones son la disminución de la evapotranspiración en los estratos medios y bajos derivada de la sombra de los árboles en el estrato superior, la protección contra plagas y enfermedades, las asociaciones micorrízicas, la fijación de nitrógeno, entre otras (Nair, 1997; Krishnamurthy y Ávila, 1999). Otra característica de adaptación de la agroforestería es la resiliencia del sistema ante condiciones extremas de temperatura y precipitación, ya que al presentarse eventos fuera de lo común, es posible que alguna especie perezca, pero otras seguirán en pie para brindarle ingresos económicos al productor al final de la época de cosecha (Torres *et al.*, 2008).

Para poder desarrollar sistemas agroforestales viables y adoptables es necesario realizar un proceso de investigación agroforestal de la unidad de tierra que se vaya a estudiar. Este proceso se divide en las etapas de caracterización, diagnóstico, experimentación, análisis de políticas, prueba de sistemas propuestos, difusión, adopción y análisis de impactos. El producto principal es la lista de los SAF y sus respectivas fichas técnicas en donde se especificará como mínimo las especies de árboles y arbustos de uso múltiple, su arreglo espacial, los regímenes de manejo (manejo del árbol y sus componentes asociados) y los niveles de desempeño (criterios biofísicos y socioeconómicos). Una de las metodologías más usadas para el diseño de SAF es el Diagnóstico y Diseño, o D&D, el cual es una familia de procedimientos para describir y analizar los sistemas actuales de uso de la tierra, para identificar las restricciones de la producción y factores causales, así como para diseñar tecnologías agroforestales apropiadas y programas de investigación (Raintree, 1983). La metodología D&D fue creada en 1977 por el International Council for Research in Agroforestry (ICRAF), ahora llamado World Agroforestry Centre (WAC), con la finalidad de desarrollar una metodología

multidisciplinaria para la planeación del desarrollo agroforestal. Esta inquietud de los investigadores del ICRAF se basó en la filosofía de que el conocimiento de un sistema existente del uso de la tierra (el diagnóstico) es esencial para planificar y evaluar programas significativos de desarrollo e investigación (el diseño) (Nair, 1997; Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Si bien la metodología D&D establece un procedimiento para proponer sistemas agroforestales, no toma en consideración atributos detallados del paisaje como pueden ser la pendiente, el tipo de suelo, el aspecto, los gradientes de temperatura y precipitación, entre otros. Por esta razón es necesario desarrollar métodos que consideren estos atributos para que complementen los procesos de diseño de tecnologías agroforestales, y poder generar con esto sistemas sostenibles. Es por lo anterior que el objetivo principal de la presente investigación fue diseñar una metodología para el establecimiento de tecnologías agroforestales con base en atributos del paisaje, las cuales pueden considerarse como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático tomando a la cuenca del Río Platanar, Chiapas como zona piloto.

Materiales y Métodos

Área de estudio. La cuenca del Río Platanar se ubica en la zona norte del estado de Chiapas, entre las coordenadas máximas 17° 37' 48" y 17° 21' 00" N; y 93° 28' 48" y 93° 08' 24" O. La cuenca se distribuye dentro del territorio de seis municipios: Sunuapa, Pichucalco, Ostucán, Juárez, Ixtacomitán y Chapultenango. La fisiografía de la cuenca se caracteriza por los sistemas de topoformas sierras, lomeríos y llanuras. La geología está conformada por rocas ígneas y sedimentarias, la arenisca del terciario es el tipo de roca que predomina con el 47 % del área de la cuenca. En cuanto a los tipos de suelo, INEGI (2002) reporta la presencia de 10 tipos, de los cuales el cambisol crómico es el que predomina con el 42 % del área total. El inventario nacional forestal (SEMARNAT-UNAM, 2001) establece que dentro de la cuenca se desarrolla la agricultura de temporal, el pastizal cultivado y la comunidad vegetal de selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria.

Caracterización detallada de la cuenca. Ya que la cartografía temática de los recursos naturales de la cuenca que se encontró se reporta a una escala pequeña y media (1'000,000 y 250,000), se realizó la caracterización detallada de los atributos del paisaje. Se consideraron cinco atributos para ser cartografiados: pendiente, vegetación y uso de la tierra, características del suelo, temperatura y precipitación. La pendiente se obtuvo con ayuda del software ArcGIS 9.3^{MR} con el modelo digital de elevación (INEGI, 2009) como insumo, la cobertura obtenida se clasificó en cinco intervalos de pendiente expresada en porcentaje (0-2, 2-8, 8-15, 15-40 y >40). Para la cartografía de la vegetación y los usos de la tierra se fotointerpretaron imágenes satelitales Quickbird en color verdadero del año 2008 y se corrigieron mediante un recorrido de campo en donde se caracterizó el tipo de comunidad vegetal y usos de la tierra encontrados. En este mismo recorrido se geo-referenciaron sitios en donde se extrajeron muestras de suelo para posteriormente ser analizadas en el laboratorio y así obtener las características edáficas de la cuenca.

Para la delimitación detallada de las isoyetas e isotermas se utilizó la metodología de Gómez *et al.* (2008), la cual utiliza los datos mensuales de temperatura y precipitación de las estaciones meteorológicas que se encuentren dentro o en la periferia de la cuenca, así como el modelo digital de elevación (INEGI, 2009), imágenes satelitales LANDSAT-7 en falso color, y la incidencia y el comportamiento de los sistemas de vientos que generan lluvia en la cuenca.

Indicadores de diagnóstico. Se aplicaron tres de los indicadores de diagnóstico que se utilizan en la metodología del ordenamiento territorial propuestos por Palacio *et al.*, (2004), estos indicadores son: calidad ecológica, fragilidad ecológica y condición actual de la vegetación. Aunado a los anteriores se evaluaron los indicadores de delimitación de zonas riparias como lo establece (UMCA, 2005) y la pérdida de suelo por erosión hídrica con base en SEMARNAT-UACH (2002).

Selección de tecnologías agroforestales. Para obtener la propuesta final de ordenamiento agroforestal en la cuenca se sobrepusieron los indicadores de diagnóstico y los atributos detallados del paisaje con ayuda del software ArcGIS 9.3^{MR}. Las combinaciones resultantes se analizaron mediante una evaluación multicriterio (Gómez y Barredo,

2006). Posteriormente se seleccionó un sistema agroforestal en cada unidad del paisaje de acuerdo a los atributos y criterios presentes con base en las descripciones de Nair (1997); Krishnamurthy y Ávila (1999); Cortés *et al.* (2005) y Bentrup (2008).

Resultados

Caracterización detallada de la cuenca. Los resultados del mapa de pendiente reportan que los terrenos planos a inclinados representan el 56.8 % en donde los terrenos planos que en su generalidad se ubican en la parte baja de la cuenca representan el 22.8 %. Los terrenos de moderadamente escarpados a escarpados representan el 43.2 % en donde solo el 4.8 % tiene intervalos de pendiente mayores al 40%. En cuanto a la vegetación y uso de la tierra se identificó al uso pecuario que comprende terrenos de potreros con pastizal inducido como la cobertura dominante con el 73.3 % de la superficie total. La comunidad de selva, que es principalmente del tipo mediana perennifolia con vegetación secundaria, es la segunda comunidad en importancia ya que se distribuye en el 24.5 % del área total y se distribuye en forma de relictos dentro de la cuenca. Las zonas sin vegetación aparente se ubican sobre las laderas del volcán Chichonal y están asociadas a los derrames lávicos de dicho cuerpo volcánico. Por su parte los asentamientos humanos constituyen el 0.3% de la superficie de la cuenca.

En cuanto a las características del suelo se identifica la presencia de depósitos de ceniza volcánica en la zona de cañadas que están en el área de influencia del volcán Chichonal, aproximadamente desde la cota de los 450 msnm hasta la parte más alta del volcán (1,200 msnm). En esta zona los suelos son de textura arenosa y se catalogan como arenosol téfrico en las regiones de mayor altitud y acrisol húmico en las regiones menos altas. En la parte media de la cuenca la textura dominante de los suelos es del tipo media y fina, catalogados como acrisol crómico en la zona de lomeríos y acrisol gleico-húmico en las regiones más bajas y planas de la cuenca. El clima de la zona de estudio es del tipo cálido húmedo con una temperatura media anual que oscila entre los 20 °C a los 26 °C, por su parte la precipitación media anual oscila entre los 2,000 mm a los 4,400 mm. El mes de Mayo es el más cálido con 27.8 °C y el más frío es Diciembre con 22.1 °C. En cuanto a humedad, Marzo es el mes más seco con 118.7 mm y Septiembre el más

húmedo con 517.4 mm. En la Figura 23 se presenta la distribución espacial de la pendiente, la vegetación, y la temperatura y precipitación media anual en la cuenca.

Indicadores de diagnóstico. La erosión hídrica dominante en la cuenca se encuentra en la categoría nula (0 a $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), la cual cubre poco más del 38 % de la superficie total. Lo anterior se debe a que son zonas con ligera y muy poca pendiente que se ubican en la planicie costera de la cuenca, por lo que más que ser emisoras de suelo, serán las receptoras de los materiales que se transportan desde la parte más alta. En lo que se refiere al intervalo de pérdida de suelo que va de 10 a $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ cubre el 36 % de la zona. Es la segunda categoría de erosión en importancia y se asocia a la inclinación de la pendiente y sobre todo a los cambios en el uso del suelo que se han observado los últimos años. Se observa principalmente en las zonas de uso pecuario, en donde se presenta una remoción de la cobertura vegetal original, lo que ha propiciado una disminución en la protección del suelo contra los efectos erosivos de la lluvia. La pérdida de suelo por erosión en los intervalos que van de nula a moderada cubren en la cuenca un 84.5 % de la superficie, lo que representa poco más de 35,000 hectáreas. Las categorías severa y muy severa (mayor de $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) se encuentran mayormente en la parte alta de la cuenca, donde se encuentran terrenos desprovistos de cubierta vegetal y cuyas condiciones edáficas y topográficas provocan que se incremente la remoción del suelo por efecto de la lluvia.

El indicador calidad ecológica reporta que el 73.3 % de la cuenca se encuentra en la categoría de calidad media. En estas zonas se desarrolla la comunidad vegetal de pastizal cultivado en donde se ha eliminado la estructura y composición del ecosistema original pero se mantiene una cobertura vegetal que protege al suelo de agentes erosivos como la lluvia o el viento. En segundo lugar se encuentra la calidad ecológica alta con el 24.5 % de la superficie total, en esta clase se encuentran las comunidades de selva en donde se presentan perturbaciones de origen antropogénico, sin embargo, la estructura y composición original del ecosistema no se ha eliminado por completo. Las categorías baja y muy baja cubren el 1.3 % y 0.8 % de la cuenca respectivamente, en estas zonas se encuentran las áreas sin vegetación aparente y los asentamientos humanos.

En cuanto al indicador fragilidad natural se identificaron cuatro categorías dentro de la cuenca. La fragilidad muy alta, que considera a las comunidades de selva, se distribuye en el 24.5 % de la superficie. Las comunidades de selva entran en esta categoría ya que son susceptibles de perder su estructura original si son expuestas a disturbios tales como incendios o expansión de la frontera agrícola. La categoría fragilidad alta cubre el 30.3 % de la cuenca y considera a las comunidades de pastizal cultivado que se encuentran sobre terrenos con pendiente superior al 15 %. Los pastizales son las zonas de apacentamiento del ganado vacuno las cuales son susceptibles al sobrepastoreo si se supera la carga animal, de presentarse esta situación la pendiente moderada y alta de estas áreas favorecerían el proceso de degradación de la tierra. La categoría fragilidad media ocupa el 44.9 % del área total, en ella se encuentra las zonas con pastizal cultivado que se encuentran en terrenos con pendiente menor al 15 %. Estas zonas se ubican en la parte centro y Noroeste de la cuenca, y debido a la poca pendiente del terreno son menos susceptibles a degradarse. Por su parte los asentamientos humanos que se distribuyen en el 0.3 % de la superficie total no se catalogan en alguna categoría de fragilidad natural.

Los resultados de la condición actual de la vegetación registran que el 75.2 % de la cuenca presenta una condición sustituida originada por los pastizales cultivados y las áreas sin vegetación aparente. Por otro lado, la condición perturbada en donde se considera a las comunidades de selva, se distribuye en el 24.5 % del área. El 0.3 % restante representa a los asentamientos humanos los cuales no entran en alguna de las categorías antes mencionadas. Las zonas riparias comprenden una superficie de 2,492.6 ha que corresponden al 5.9 % del total de la superficie de la cuenca, se ubican en las zonas de influencia de los cauces de agua permanentes. En la Figura 24 se presenta la cartografía de los indicadores erosión hídrica, calidad ecológica, fragilidad natural y zonas riparias.

Ordenamiento agroforestal. Con base en el análisis de la evaluación multicriterio se propone el establecimiento de nueve tecnologías agroforestales en la cuenca del Río Platanar. En la Figura 25 se presenta el mapa con la distribución espacial de los sistemas agroforestales, los cuales se describen a continuación.

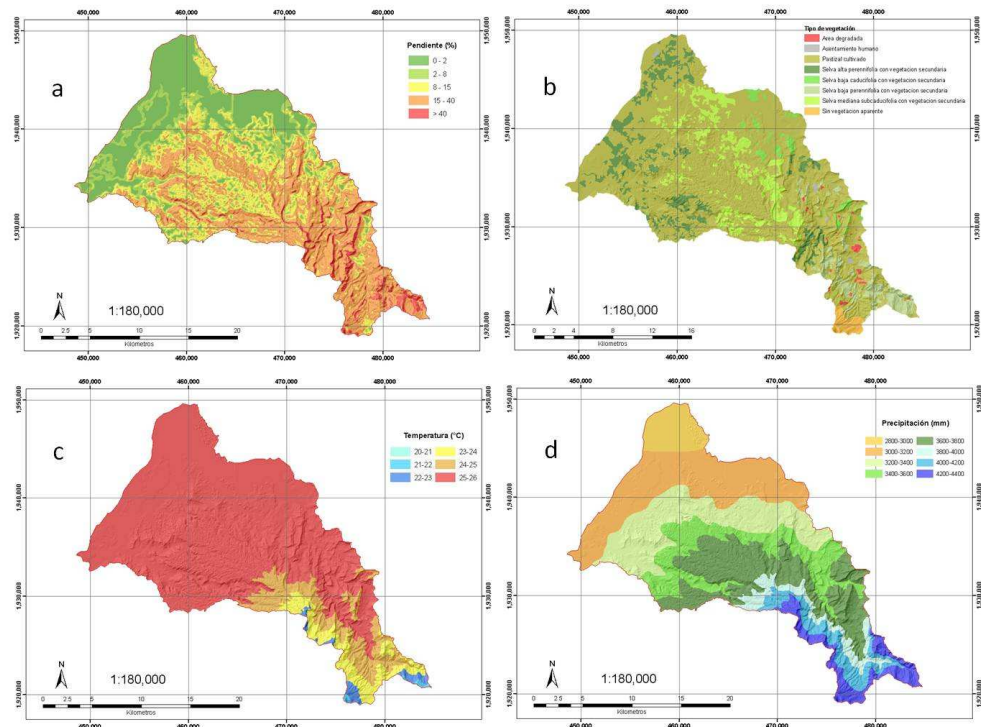


Figura 23. Caracterización detallada de la cuenca del Río Platanar (a-pendiente, b-vegetación, c-temperatura media anual, d-precipitación media anual)

El sistema Acahual mejorado se propone establecerlo en el 2.8 % de la cuenca, específicamente en las zonas que presentan degradación de la cubierta vegetal que se ubican principalmente en la zona de cañadas en el extremo Este. La función principal del acahual mejorado es la protección del suelo en contra del efecto erosivo de la lluvia, así como la rehabilitación de la fertilidad de los horizontes superficiales y el incremento del carbono en la parte aérea y subterránea. Las especies de árboles y arbustos de usos múltiple (AYAUM) que se pueden establecer en estos sistemas deben de ser del tipo pioneras o tolerantes como por ejemplo el canshan o volador (*Terminalia amazonia*), el guaje (*Leucaena leucocephala*) o el zapote (*Manilkara zapotilla*).

El Agrobosque se propone implementarlo en las zonas donde actualmente se desarrollan las selvas que corresponden al 24.5 % de la superficie de la cuenca. En este sistema se sugiere introducir especies agrícolas ya sean perennes o anuales de las que se obtengan productos para que el autoconsumo o la venta por parte de las comunidades, sin alterar

en gran medida la composición y estructura del ecosistema. Como ejemplo de especies a introducir están el plátano (*Musa paradisiaca*), el maíz (*Zea mays*) o el frijol (*Phaseolus* spp.). La Agroforestería riparia tiene la finalidad de disminuir el flujo de los lixiviados, sedimentos o contaminantes hacia los cauces de agua, además de reducir el volumen de escurrimiento gracias el incremento de la infiltración, otro beneficio de las zonas riparias es la rehabilitación de la vegetación de galería que sirve de hábitat para la fauna local. Esta tecnología agroforestal se propone establecerla en los márgenes de los ríos a una distancia de 50 m por cada lado y se estima que cubra el 5.9 % de la superficie de la cuenca. Similar a los Agrobosques, la Agroforestería riparia considera la repoblación de especies nativas adaptadas a las condiciones de alta humedad en el suelo como por ejemplo el sauce (*Salix humboldtiana*), el helecho arbóreo (*Cyathea mexicana*) o el amate (*Ficus* spp.), además de la introducción de especies agrícolas o forestales.

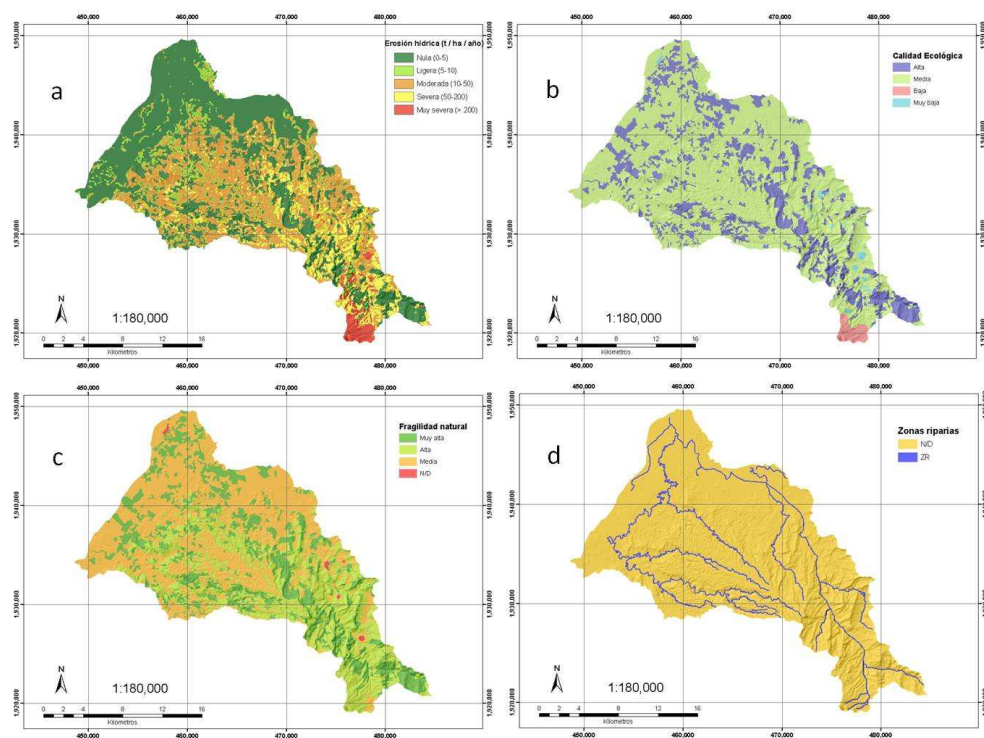


Figura 24. Indicadores de diagnóstico en la cuenca del Río Platanar (a-erosión hídrica, b-calidad ecológica, c-fragilidad natural, c-zonas riparias)

El sistema silvopastoril Árboles dispersos en potreros se propone introducirlo en la mayoría de las zonas que presentan fragilidad natural alta, que son los pastizales

cultivados que se desarrollan en terrenos con más del 15 % de pendiente, la superficie de este sistema cubre el 25.5 % del área total de la cuenca. Al establecer árboles o arbustos de uso múltiple dentro de los actuales pastizales, se incrementa la protección de estos paisajes en contra del efecto erosivo de la lluvia, además se disminuye el área con exposición directa de la radiación solar lo que merma el estrés calórico de las cabezas de ganado. Otra característica de esta tecnología agroforestal es que diversifica el alimento que es consumido por el ganado lo que disminuye la presión del pastoreo sobre las gramíneas. Algunas especies que son oriundas de la zona de estudio y que se han utilizado para este fin en otras comunidades del estado de Chiapas son *Acacia angustissima*, *Guazuma ulmifolia*, *Leucaena leucocephala*, *Pithecellobium dulce* y *Erythrina chiapasana*.

El Cultivo en callejones es otro sistema que cubre el 8.2 % del área total, se propone en las zonas centro-Oeste y Norte de la cuenca, especialmente en las áreas con pendientes moderadas que van del 8 % al 15 %. El uso actual de la tierra en esta superficie es el pecuario con pastizales cultivados en donde se presenta una tasa de erosión ligera y moderada. Las especies que se pueden establecer como cultivo son el maíz, el frijol, el chile piquín, entre otros, y las especies leñosas que se ubican intercaladas entre las hileras de cultivo pueden ser la *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium* o *Erythrina chiapasana*. El sistema Cultivo-plantación es similar al Cultivo en callejones, con excepción de que presenta una menor superficie (7.4 %) además de que se plantea establecerse en zonas de menor altitud, cerca de los límites con las zonas más bajas de la cuenca. Actualmente se desarrolla el pastizal cultivado en la mayoría de esta área pero se pueden encontrar pequeñas plantaciones de cedro rojo (*Cedrela odorata*) lo que favorecería la introducción del sistema Cultivo-plantación. Las especies leñosas que se podrían aprovecharían son *C. odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tectona grandis*, *Hevea brasiliensis* o bien *Theobroma cacao*.

El sistema agroforestal Milpa intercalada con árboles frutales (MIAF) se propone establecerlo en la zona de cañadas del centro-Este y sur de la cuenca. Con una superficie del 8.3 % del área total, el sistema MIAF funcionaría como práctica de conservación de suelo ya que se presentan pendientes mayores al 15 % y una tasa de erosión moderada.

Con la implementación de esta tecnología se evitaría el pastoreo en esta región de terrenos escarpados y con alto potencial a ser erosionado. Como ejemplo de cultivos potenciales se tiene al maíz y al frijol, y en el caso de los frutales a la guanabana (*Annona muricata*), el limón (*Citrus limon*), la papaya (*Carica papaya*) y la guayaba (*Psidium guajaba*).

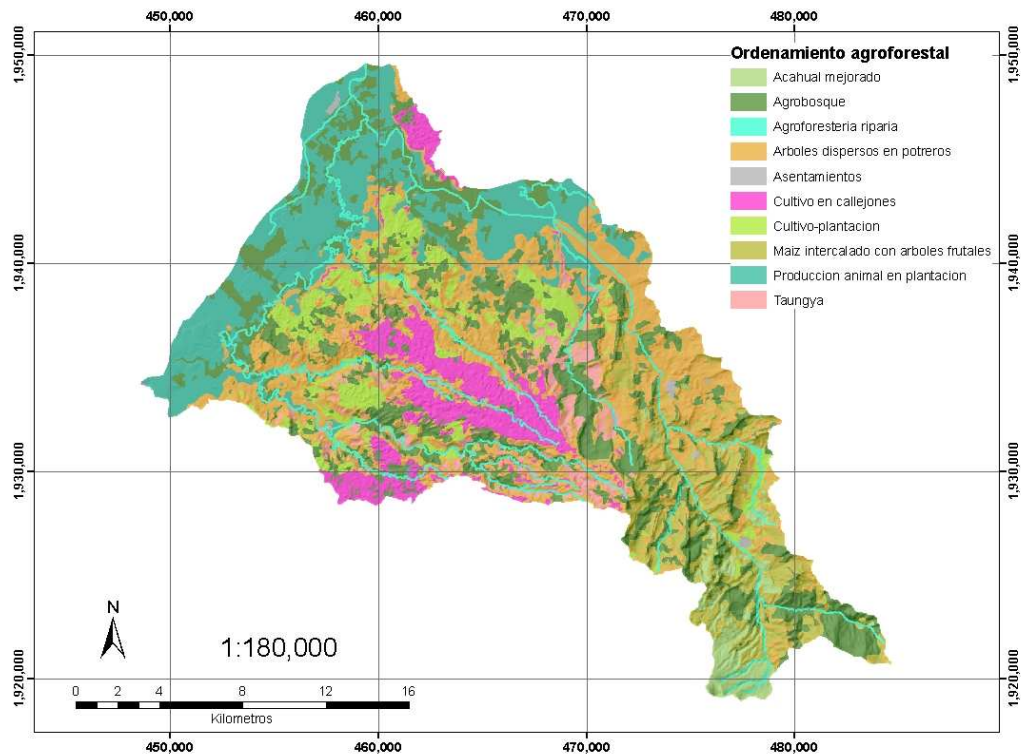


Figura 25. Ordenamiento agroforestal en la cuenca del Río Platanar

En la zona Norte de la cuenca donde se presenta la planicie aluvial se propone establecer el sistema de Producción animal en plantación en una superficie de 6,970.5 ha que corresponden al 16.4 % de la superficie total. El objetivo principal de esta tecnología agroforestal es establecer plantaciones de especies maderables como *C. odorata*, *S. macrophylla* o *T. grandis*, o bien de producción agrícola como *T. cacao* o *Persea americana*, y aprovechar la existencia de pastizales para seguir alimentando al ganado. El establecimiento de las plantaciones incrementaría la demanda evapotranspirativa, lo que ayudaría a disminuir el nivel freático en estas zonas que son propensas a inundarse debido a los terrenos con poca pendiente. Por último se tiene al sistema Taungya que se propone establecerlo en el 3.3 % de la cuenca en la zona centro. La principal

característica de esta región es la presencia de erosión severa que rodea a los relictos de selva. La implementación de esta tecnología ayudaría a disminuir el riesgo de erosión hídrica y al mismo tiempo sería una zona de amortiguamiento de los ecosistemas mejor conservados de la cuenca. Las especies leñosas a plantar serían de crecimiento rápido y abastecerían de leña a las comunidades cercanas; en cuanto a los cultivos, el maíz y el frijol podrían ser las mejores opciones. Una vez que las especies arbóreas han cubierto el dosel, el sistema Taungya podría evolucionar al sistema Agrobosque.

Otros sistemas agroforestales de igual manera se pueden establecer en la cuenca pero de forma más local dentro de las comunidades rurales de la zona de estudio. Estos sistemas son los huertos caseros, la acuaforestería, los cercos vivos, la entomoforestería y los bancos de forraje y de leña.

Discusión y Conclusiones

La cuenca del Río Platanar presenta una gran diversidad de paisajes, desde planicies aluviales hasta zonas de cañadas con más de 40 % de pendiente. Además del relieve, la ubicación geográfica de la zona de estudio propicia que sea una de las regiones de mayor diversidad biológica de México ya que al encontrarse en la zona de barlovento con orientación hacia el Golfo de México, los sistemas de vientos como los alisios y los huracanes no encuentran obstáculos lo que genera lluvias en más de siete meses y disponibilidad de humedad en el suelo para la vegetación durante todo el año.

Esta característica ha favorecido que las comunidades humanas transformen el paisaje natural de la cuenca al introducir zonas de pastizal cultivado en más del 50 % de la superficie para alimentar al ganado vacuno, práctica de la cual obtienen gran parte de sus ingresos económicos. Debido a la transformación de la cobertura vegetal se ha perdido el relativo equilibrio del ciclo hidrológico que se tenía con la vegetación clímax antes de la llegada de las poblaciones humanas a la cuenca, esta situación permite que los eventos extremos originados por la variabilidad climática tales como el fenómeno del ENOS (El Niño Oscilación del Sur) o la entrada de frentes fríos, sobrepasen la capacidad de amortiguamiento de la cuenca, presentándose así flujos de agua o de sedimentos que

provocan inundaciones o azolvamiento de los cuerpos de agua. Aunado a esta variabilidad climática se tiene al fenómeno de cambio climático antropogénico, el cual provocará un incremento en la temperatura y variaciones en la cantidad y periodicidad de las lluvias, situación podría impactar negativamente a los sistemas hídrico, biológico y productivo de la región.

Los sistemas agroforestales aquí propuestos intentan resolver los problemas de degradación de la tierra originada por la pérdida de suelo por erosión hídrica, la merma en el aprovisionamiento de los servicios ecosistémicos y la disminución en la producción agropecuaria, pero además, se sugieren como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. La mitigación considera que el contenido de carbono en la biomasa y en el suelo se incrementará debido al aumento en cantidad y diversidad de especies por unidad de superficie que se obtendrá en cada uno de los sistemas, como lo demuestra Kandji *et al.* (2006) y Roncal *et al.* (2008). Por su parte la fortaleza de los sistemas agroforestales como una opción para la adaptación al cambio climático, radica en el incremento de la infiltración de agua hacia el subsuelo al aumentar la composición de especies, lo que disminuye el volumen de agua que escurre superficialmente, especialmente en los sistemas Agrobosque, Agroforestería riparia y Acahual mejorado.

Por otra parte, se diversificaría la cantidad de productos agrícolas y forestales de los cuales los habitantes podrían obtener ingresos económicos alternos a su actividad principal. Además, se podría solicitar a la Comisión Nacional Forestal el ingreso al programa de pago por servicios ambientales, o bien, a los apoyos por venta de créditos de carbono de la estrategia REDD++, lo que representaría otra entrada de ingresos. Con esta diversificación de productos se reduciría la vulnerabilidad de los agricultores o productores de ganado a los eventos extremos que se podrían presentar con el fenómeno del cambio climático.

Agradecimientos

Se agradece a la Comisión Nacional del Agua y a la Universidad Autónoma Chapingo por el financiamiento de la presente investigación a través del proyecto “Implementación

de Acciones para el Manejo del Agua y Preservación del Suelo en Microcuencas Prioritarias de la parte Alta y Media de la Cuenca del Río Platanar, comprendida entre los estados de Tabasco y Chiapas” de acuerdo al convenio de colaboración No. SGIH-GDTH-UACH-010/06/RF/CC.

Referencias

- Bentrup, G. 2008. Conservation buffers: design guidelines for buffers, corridors and greenways. General Technical Report SRS-109. United States Department of Agriculture. E.U.A. 136 pp.
- CICC. 2007. Estrategia nacional de cambio climático. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 163 pp.
- CMNUCC. 1998. Protocolo de Kyoto. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Alemania. 25 pp.
- Cortés, J.I., A. Turrent, P. Díaz, E. Hernández, R. Mendoza y E. Aceves. 2005. Manual para el establecimiento y manejo del sistema milpa intercalada en árboles frutales en laderas. Colegio de Postgraduados. México. 27 pp.
- Gómez, J.D., J. Etchevers, A. Monterroso, C. Gay, J. Campo y M. Martínez. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21(1): 35-56
- Gómez, M. y J.I. Barredo. 2006. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio. Editorial Alfa-Omega. México. 279 pp.
- INEGI. 2002. Unidades de suelo de la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. (cartografía digital).
- INEGI. 2009. Continuo de elevaciones mexicano. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. (cartografía digital).
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: informe de síntesis. Cambridge University Press. Suiza. 104 pp.

- Kandji, S.T., L.V. Verchot, J. Mackensen, a. Boye, M. Van Noordwijk, T.P. Tomich, C. Ong, A. Albrecht, C. Palm. 2006. Opportunities for linking climate change adaptation and mitigation through agroforestry systems. *En:* Garrity, D., A. Okono, M. Gryson y S. Parrott (eds). World Agroforestry into the future. World Agroforestry Centre. Kenya. p. 113-121.
- Krishnamurthy, L. y M. Ávila. 1999. Agroforestería básica. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México. 340 pp.
- Krishnamurthy, L., K. Krishnamurthy, I. Rajagopal y A. Arroyo. 2003. Introducción a la agroforestería para el desarrollo rural. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 105 pp.
- Nair, P.K. 1997. Agroforestería. Universidad Autónoma Chapingo. México. 543 pp.
- Nair, P.K., V.D. Nair, S.K. Saha, S.G. Haile, D.S. Howlett, A.N.G. Takimoto, E.F. Gama, R.G. Tonucci, M.R. Mosquera y B.M. Kumar. 2009. Climate change mitigation through agroforestry: science in support of the concept. *En:* WAC. Book of Abstracts, 2nd World Congress of Agroforestry. World Agroforestry Centre. Kenya. p. 9-10
- Palacio, J.L., M.T. Sánchez, J.M. Casado, E. Propin, J. Delgado, A. Velásquez, L. Chias, M.I. Ortiz, J. González, G. Negrete, J. Gabriel, R. Márquez, T. Niedo, R. Jiménez, E. Muñoz, E. Ocaña, E. Juárez, C. Anzaldo, J.C. Hernández, K. Valderrama, J. Rodríguez, J.M. Campos, H. Vera y C.G. Camacho. 2004. Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Secretaría de Desarrollo Social. México. 161 pp.
- Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson (eds.). 2007. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. E.U.A. 976 pp.
- Raintree, J.B (ed.). 1983. Resources for agroforestry diagnosis and design. Working Paper 7. International Council for Research in Agroforestry. Kenya. 352 pp.
- Rivera, M.A. 1999. El cambio climático. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. México. 85 pp.
- Roncal, S., L. Soto, J. Castellanos, N. Ramírez y B. de Jong. 2008. Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia* 33(3): 200-206

SEMARNAT-UACH. 2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo. México. 154 pp.

SEMARNAT-UNAM. 2001. Inventario nacional forestal de México 2001 escala 250,000. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Universidad Nacional Autónoma de México. México. (cartografía digital).

Solomon, S., D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.). 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. Cambridge University Press. E.U.A. 996 pp.

Torres, J., A. Tenorio y A. Gómez (eds.). 2008. Agroforestería: una estrategia de adaptación al cambio climático. Comisión Europea, Soluciones Prácticas-ITDG. Perú. 125 pp.

UMCA. 2005. Establishing and managing riparian forest buffers. University of Missouri Center for Agroforestry. E.U.A. 20 pp.

CONCLUSIONES GENERALES

La cuenca del Río Platanar se encuentra en una de las zonas de mayor diversidad biológica de México gracias a su ubicación geográfica y a sus características climáticas, geológicas y orográficas. Aproximadamente a mediados del siglo XX se ha incrementado la presión sobre los recursos naturales de la zona, dando como resultado el paisaje que actualmente tiene en donde los pastizales cultivados son la comunidad vegetal dominante y las áreas de vegetación natural (selvas) moderadamente perturbadas se restringen a relictos dispersos que se concentran mayormente en la zona centro y Sureste de la cuenca. Aunque las gramíneas de los pastizales cultivados permanecen con follaje durante todo el año gracias al aporte de humedad constante, se presentan zonas con problemas de degradación de la cubierta vegetal debido al sobrepastoreo en terrenos con pendiente superior al 15 %.

La mayor tasa de captura de carbono en la parte aérea se presenta en la comunidad de la selva alta perennifolia con vegetación secundaria con poco menos de 100 MgC ha^{-1} . Por el contrario y debido a su poca diversidad de especies, el pastizal cultivado registra la menor cantidad de carbono en la parte aérea por superficie con 10 MgC ha^{-1} . En lo referente al carbono orgánico del suelo, los sistemas terrestres Lomeríos y Planicie Aluvial son las zonas con la mayor cantidad de COS con más de 96.6 MgC ha^{-1} , de manera opuesta, las áreas con problemas de degradación de la cubierta vegetal se registra el menor contenido de COS con menos de 7.2 MgC ha^{-1} .

En lo que respecta al servicio ambiental hidrológico en forma de recarga de agua hacia el subsuelo, se identifica a la región Norte que presenta terrenos planos como la zona con mayor potencial de recarga de agua con una lámina de 500 a 550 mm de agua al año. Cabe resaltar que los valores de recarga de agua en el subsuelo están íntimamente

relacionados con el tipo de cobertura vegetal que se desarrolla, una cobertura densa como son los bosques o las selvas generan más estabilidad en las variables hidrológicas, y se esperaría que presentaran más volumen infiltrado y evapotranspirado; por el contrario se esperaría una menor cantidad de agua en forma de escurrimiento y de déficit hídrico. En la parte centro-sur de la cuenca se identificaron áreas con problemas de degradación en la cobertura vegetal y en las cuales se incrementa el escurrimiento y se disminuye la infiltración, es necesario establecer prácticas de conservación del suelo en estas zonas para poder rehabilitarlas y así evitar que el servicio hidrológico de recarga de agua se vea afectado.

Como se puede observar mediante las estimaciones de captura de carbono y recarga de agua, la cuenca del Río Platanar presenta un alto potencial para brindar servicios ambientales, sin embargo, se observa que el aprovechamiento actual de los recursos naturales está disminuyendo este potencial. Por esta razón se propone una serie de sistemas agroforestales que intentan resolver los problemas de degradación de la tierra originada por la pérdida de suelo por erosión hídrica, la merma en el aprovisionamiento de los servicios ecosistémicos y la disminución en la producción agropecuaria, pero además, se sugieren como estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Las principales características de la agroforestería para este fin es el incremento en el carbono de la parte aérea y subterránea además de la diversificación de los productos con potencial de autoconsumo o venta por parte de las poblaciones que se encuentran dentro de la cuenca.

RECOMENDACIONES

Se recomienda desarrollar ecuaciones alométricas de las especies arbóreas y arbustivas de la cuenca para poder afinar la cuantificación de carbono en la parte aérea, ya que el uso de ecuaciones creadas en otros sitios puede sobrestimar o subestimar la cantidad de carbono.

En cuanto a la evaluación del servicio hidrológico, se recomienda hacer mediciones directas en campo de infiltración y escurrimiento para poder calibrar los resultados del balance de humedad de Thornthwaite.

Con respecto a la propuesta de ordenamiento agroforestal se recomienda realizar talleres participativos en las comunidades para ajustar el diseño de las tecnologías agroforestales a la visión de los habitantes de la cuenca y con esto facilitar el proceso de adopción de los sistemas sugeridos. Además, con la ayuda de los pobladores y de los centros de investigación que estén trabajando en la región, se puede obtener una mayor cantidad de especies, de preferencia nativas, que sirvan como árboles y arbustos de uso múltiple para ser implementadas en las tecnologías agroforestales.