



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA

POSGRADO EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

TESIS DE MAESTRÍA:

**“CARACTERIZACIÓN MULTITEMPORAL MEDIANTE PERCEPCIÓN
REMOTA Y ANÁLISIS ESPACIAL DEL CAMBIO DE COBERTURA
TERRESTRE Y SUS EFECTOS EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y
ALMACENAJE DE CARBONO EN LA CUENCA USUMACINTA”**

TESISTA: ALVARADO ARRIAGA VIOLETA YOALLI

DIRECTOR DE TESIS: TAPIA SILVA FELIPE OMAR

ASESORA: ROJAS SERNA CLAUDIA

Ciudad de México, México

2017

ÍNDICE

DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
OBJETIVOS	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS PARTICULARES	6
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	6
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INMEDIATOS	7
MARCO TEÓRICO	8
CARACTERIZACIÓN MULTITEMPORAL	8
GEOMÁTICA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	9
PERCEPCIÓN REMOTA Y ANÁLISIS ESPACIAL	11
COBERTURA TERRESTRE	18
CONCEPTOS: COBERTURA TERRESTRE Y USO DE SUELO	18
CAMBIOS DE COBERTURA TERRESTRE A NIVEL GLOBAL Y NACIONAL	19
TIPOS DE COBERTURA TERRESTRE EN LA CUENCA USUMACINTA	21
CICLO HIDROLÓGICO	24
EVAPOTRANSPIRACIÓN	25
EFECTOS DEL CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE SOBRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	27
EFECTOS DEL CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE EN EL ALMACENAJE DE CARBONO	28
RELACIÓN ENTRE CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIO DE COBERTURA FORESTAL	30
CUENCA HIDROGRÁFICA	32
CUENCAS Y SERVICIOS AMBIENTALES	35
CUENCA USUMACINTA	36
SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN LA CUENCA USUMACINTA	38
PROBLEMÁTICA SOCIAL EN LA CUENCA USUMACINTA	40
PROBLEMÁTICA COMO CUENCA TRANSFRONTERIZA	41
CRECIMIENTO POBLACIONAL EN LA CUENCA USUMACINTA	43
ACTIVIDADES ECONÓMICAS DE LA CUENCA USUMACINTA	43
ANTECEDENTES INMEDIATOS A ESTA INVESTIGACIÓN	44
CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE EN LA CUENCA USUMACINTA	44

EFFECTOS DEL CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN	45
EFFECTOS DEL CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE EN EL ALMACENAJE DE CARBONO	46
MODELO GEOESPACIAL CONCEPTUAL	47
<u>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA</u>	<u>49</u>
MODELO GEOESPACIAL CONCEPTUAL	49
ESQUEMA CONCEPTUAL	49
DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	51
CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE	52
IMÁGENES SATELITALES	52
CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA.	52
CLASIFICACIÓN POR MÁXIMA PROBABILIDAD Y SU VALIDACIÓN	53
ANÁLISIS DE CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE.	55
EVAPOTRANSPIRACIÓN	56
RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE Y EL CAMBIO EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.	57
RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE Y EL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LAS SUPERFICIES FORESTALES	59
<u>CAPITULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</u>	<u>61</u>
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
MODELO GEOESPACIAL CONCEPTUAL	61
DEFINICIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO A PARTIR DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA SUPERFICIAL	63
COBERTURA TERRESTRE	64
CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA	64
CLASIFICACIÓN POR MÁXIMA PROBABILIDAD	65
ANÁLISIS DE CAMBIO DE LA COBERTURA TERRESTRE	68
EVAPOTRANSPIRACIÓN	73
EVAPOTRANSPIRACIÓN A NIVEL DE CUENCA.	74
EVAPOTRANSPIRACIÓN A NIVEL DE ÁREAS DE CAPTACIÓN.	75
RELACIÓN ENTRE COBERTURA TERRESTRE Y EVAPOTRANSPIRACIÓN	77
RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A NIVEL DE CUENCA	77
RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A NIVEL DE ÁREAS DE CAPTACIÓN.	78
RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO DE COBERTURA TERRESTRE Y EL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN LAS SUPERFICIES FORESTALES.	82
<u>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	<u>84</u>

CONCLUSIONES	84
CONCLUSIONES CON RESPECTO A LA METODOLOGÍA	84
CONCLUSIONES CON RESPECTO A LOS RESULTADOS	85
CONCLUSIONES GENERALES.	86
RECOMENDACIONES	87
LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN SUGERIDAS	87
<u>REFERENCIAS</u>	<u>88</u>
<u>ANEXO 1</u>	<u>96</u>
<u>ANEXO 2</u>	<u>97</u>
<u>ANEXO 3</u>	<u>107</u>
<u>ANEXO 4</u>	<u>116</u>
<u>ANEXO 5</u>	<u>118</u>

DEDICATORIA

Este trabajo representa la culminación del esfuerzo y labor de muchos años. No son los grados académicos tan valiosos como toda la historia que llevan detrás. He superado muchos miedos, dudas e inseguridades. Me he hecho grande y he llegado aquí, justo a este momento y me conmuevo por eso. Aunque sin duda esto no hubiera sido posible sin la intervención de grandes e importantes personas en mi vida.

Quiero dedicar este trabajo a mí, pero no como una adulta ególatra. Me dedico este trabajo como un medio para honrar a la niña y adolescente que fui, y a mí como adulta, como una manera de reconocermelo fuerte, tenaz e independiente, como una mujer en movimiento.

También dedico este trabajo a mis padres y hermanos, que amo con todo el corazón. Gracias por ser mis maestros de vida, por nuestra historia, por sus enseñanzas, por haberme apoyado e impulsado. Me siento honrada por tener la oportunidad de compartir esto con ustedes.

Sin duda alguna dedico esto a mis abuelos, por darme cobijo y protección cuando lo necesitaba. Gracias a mi abuela por haberme empujado y por ser fuerte ante todo. Gracias a mi abuelo por ser paciente y cálido. Gracias por hacerme sentir segura.

Por último, quiero dedicar esto a mis gatas, a todas ellas. El amor que me han dado ha sido tan grande y genuino que me ayudaron a sanar y a sentir. Les agradezco con mucho amor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor, el Dr. Felipe Omar Tapia Silva por haber aceptado ser mi mentor, por motivarme a avanzar, por su enseñanza, buena disposición y apoyo constante. Gracias por haber sido paciente y empático.

Gracias a mis profesores de posgrado que me enseñaron a reflexionar y a tratar de entender los problemas desde varios ángulos, principalmente a la Dra. Fabiola Sosa y al profesor Enrique Mendieta.

Gracias a mis sinodales: el Dr. Juan Manuel Núñez, la Dra. Fabiola Sosa y la Dra. Claudia Serna por ser parte de este proceso.

Gracias al personal administrativo por su accesibilidad

A todos ¡Gracias!

RESUMEN

La cuenca Usumacinta es una de las cuencas más importantes de nuestro país, ésta se caracteriza por ser basta en recursos hídricos, poseer una gran riqueza biológica, económica y cultural. No obstante, en las últimas décadas la cuenca ha sido fuertemente impactada por las actividades humanas, de tal forma que la explotación de los recursos naturales ya ha mermado la capacidad de la cuenca para ofrecer algunos servicios ecosistémicos, entre los que se encuentran la capacidad de evapotranspiración, siendo está un elemento clave en el balance hídrico, o bien, el almacenaje de carbono en la biomasa forestal, un fenómeno importante para la mitigación del bióxido de carbono como gas de efecto invernadero, que a grandes concentraciones promueve el cambio climático.

Ante este panorama, el proyecto que aquí se presenta se diseñó para caracterizar los cambios que ha sufrido la cuenca Usumacinta a través del tiempo y los cambios consecuentes que han tenido los servicios ecosistémicos antes mencionados.

De esta forma, en el presente documento podrá hallarse el contexto social, económico y ambiental en el que se ha visto envuelta la cuenca Usumacinta, el cual se plasma en un Modelo Geoespacial Conceptual. Posteriormente, se describe la metodología propuesta para: la caracterización espacial de la cobertura terrestre en la cuenca, la estimación de los cambios en la evapotranspiración entre 2001 y 2009, el procedimiento realizado para estimar si existe correlación entre el cambio de cobertura y el cambio de evapotranspiración, y finalmente, el método para estimar el bióxido de carbono conservado, perdido y capturado desde 1985 hasta 2015 debido al cambio de cobertura forestal.

Asimismo, se presentan los resultados obtenidos al realizar las metodologías antes mencionadas. En términos generales, se encontró que la cobertura forestal ha sido severamente reducida desde 1985 hasta el 2015, siendo principalmente la cobertura agrícola-pastizal la que ha suplido el espacio dejado por la cobertura forestal. Por su parte, la capacidad de evapotranspiración de la cobertura vegetal disminuyó en el tiempo. Estas dos variables si tienen una correlación significativa, la cual puede verse de forma más tangible a pequeñas escalas. Finalmente, se estimó también que la pérdida de cobertura forestal ha liberado grandes volúmenes de dióxido de carbono, la cual ha sido imposible suplir, a pesar de que en 2015 se registró una pequeña área reforestada, lo que significa indirectamente que se capturo dióxido de carbono que se convirtió en biomasa forestal.

Por último en las conclusiones del proyecto se responden a las preguntas de investigación, las cuales fueron satisfactoriamente respondidas. En esta sección también se presentan algunas recomendaciones y líneas de investigación a seguir.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la relación espacio-temporal en la cuenca Usumacinta del cambio de cobertura terrestre con los cambios en la evapotranspiración y en el almacenaje de carbono.

Objetivos particulares

1. Analizar las tendencias de los cambios en la cobertura terrestre en la cuenca Usumacinta.
2. Determinar los cambios en la evapotranspiración en la cuenca Usumacinta
3. Determinar si existe una relación espacio-temporal de los cambios en la evapotranspiración con respecto a los cambios en la cobertura terrestre en la cuenca Usumacinta.
4. Estimar cambios en el almacenaje de carbono relacionados con la cobertura terrestre.

Preguntas de investigación

Las preguntas de investigación están planteadas para responder a cada objetivo, de tal forma que la pregunta 1.1 responde al objetivo uno, y así sucesivamente.

- 1.1 ¿De qué manera la cobertura terrestre ha variado en la cuenca Usumacinta?
- 2.1 ¿Cómo se ha alterado la proporción del agua que se evapora en las áreas de captación?
- 2.2 ¿Cómo se ha alterado la evapotranspiración en la cuenca Usumacinta?
- 3.1 A nivel de cuenca ¿Cómo se relacionan los cambios de cobertura terrestre con la evapotranspiración?
- 3.2 ¿De qué manera han afectado los cambios en la cobertura terrestre a la evapotranspiración en las áreas de captación?
- 4.1 ¿Cómo se ha alterado el almacenaje de carbono en la cuenca Usumacinta debido al cambio de cobertura terrestre?

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES INMEDIATOS

En este capítulo se abordó la información teórica relevante con respecto a los estudios multitemporales de cobertura terrestre y su papel intrínseco en problemáticas territoriales. La caracterización multitemporal se concibe como el estudio de la relación entre variables del territorio en términos de espacio y tiempo. Estos se consideran, elementos clave en la descripción de los cambios que ocurren en los factores ambientales que tienen lugar en el espacio.

Geomática es la disciplina a la que se recurre para realizar dichas descripciones aplicando teoría y práctica de otras disciplinas convergentes. Entre estas está Percepción Remota (PR) que proporciona información necesaria para clasificar el espacio en función de su respuesta al tipo de luz incidente y para definir patrones espaciales que se manifiestan en el transcurrir del tiempo. Otras disciplinas de la Geomática que se aplican en este estudio son Sistemas de Información Geográfica (SIG) como eje de integración (Tapia, 2014), y análisis espacial. Estas funcionan como medio para integrar y generar información georreferenciada, tecnologías y personas en un mismo sistema que permite abstraer información útil que ayude al manejo futuro y actual de los recursos naturales.

Como ya se mencionó, en esta investigación nos enfocamos en los cambios de cobertura terrestre como una actividad que incide en dos componentes primarios de una cuenca vista como sistema territorial: 1) evapotranspiración como elemento fundamental en el balance hídrico. Se trata de un factor clave para la fisiología de las plantas y condiciones locales del suelo. Así también, este factor favorece las condiciones para que el ciclo hidrológico tenga continuidad en las cuencas hidrográficas y contribuye en el equilibrio climático a escala global; 2) el secuestro de carbono, que funciona como un elemento regulador del bióxido de carbono, que en exceso provoca eventos meteorológicos que pueden ser catastróficos para el bienestar humano. Es por esta razón que es imprescindible conocer cuáles son los patrones de deforestación para poder diseñar las estrategias integrales de mitigación sobre el exceso de carbono en la atmósfera.

Así mismo, con la investigación se aborda la relevancia de las cuencas hidrográficas, como unidades funcionales, que involucran elementos bióticos y abióticos, cuya interacción determina los recursos naturales disponibles. La zona de estudio a la que se delimita la presente investigación es la cuenca Usumacinta. Como parte del proceso de análisis conceptual se identifican los elementos que influyen en el cambio de cobertura terrestre. Estos componentes se plasman en el desarrollo de un Modelo Geoespacial Conceptual (Tapia, 2016) que fue construido a partir de una búsqueda holista de los componentes que intervienen o se ven afectados por el cambio de cobertura terrestre.

Adicionalmente, al final del capítulo se encontrará una pequeña recopilación de los antecedentes inmediatos a este trabajo sobre el cambio de cobertura terrestre y sus efectos en la evapotranspiración y almacenamiento de carbono.

MARCO TEÓRICO

Caracterización multitemporal

Los estudios multitemporales consideran de manera intrínseca dos variables: el espacio y el tiempo. Estos juegan un papel determinante en la ubicación y oportunidad de las actividades sobre la naturaleza (Bone & Dragicevic, 2009). En este sentido, la dinámica de los fenómenos ambientales que manifiestan cambios en el tiempo tienen dos aspectos relacionados, la rapidez con que el fenómeno se produce y la subsistencia del cambio (Chuvienco, 2008). La rapidez hace alusión al tiempo en el que se presenta algún fenómeno sobre el ambiente, ya que pueden durar desde algunas horas (ciclones tropicales, terremotos, erupciones volcánicas) hasta varios años (desertificación, crecimiento urbano). Adicionalmente, Chuvienco (2008) menciona que la subsistencia del fenómeno se refiere a la permanencia de los efectos de esa perturbación, que también puede variar en un ciclo de pocos días hasta varios años. Así por ejemplo, los cultivos requieren de un inventario anual, mientras que la cobertura terrestre precisa de un inventario quinquenal. En este sentido, los estudios multitemporales adquieren relevancia ante la necesidad de la adquisición de información actualizada y útil.

Ahora bien, las indagaciones que se puedan realizar en torno a la dimensión temporal pueden abordarse desde PR, con un doble objetivo: la recopilación de datos con un período multiestacional o multianual. En el caso multiestacional, la dimensión temporal sirve para refinar la discriminación de algunas categorías atendiendo su variedad fenológica, como por ejemplo: la respuesta de la vegetación a las estaciones del año. En el caso del análisis multianual tiene el objetivo de detectar los cambios producidos entre dos o más fechas, mediante imágenes adquiridas en distintos años que se comparan visual o digitalmente (Chuvienco, 2008). En la comparación multitemporal es imprescindible asegurar que las imágenes estén situadas en la misma zona para ambas fechas, y que la variable que se esté comparando se encuentre en la misma escala de medida (Chuvienco, 2008). La disponibilidad de las series temporales relativamente largas (multitemporal) de datos de percepción remota se ha utilizado para caracterizar la cobertura terrestre (Hirosawa et al., 1996). Esto se logra mediante técnicas de clasificación, de las cuales se hablará con mayor detalle en el siguiente apartado. A grandes rasgos estos procedimientos se encargan de crear categorías preestablecidas que clasifiquen el espacio de la zona de estudio. No obstante, las clases de cobertura terrestre pueden jerarquizarse de acuerdo con el tipo de vegetación o/y las características fenológicas para elaborar las reglas para la clasificación multitemporal (Kantakumar y Neelamsetti, 2015).

La comprensión de la relación entre la dinámica de los patrones espaciales que se revelan con el tiempo y que surgen como resultado de las actividades humanas es imprescindible. Al respecto, cambio de cobertura terrestre y uso de suelo crean parches que vulneran viabilidad de vida silvestre, variabilidad microclimática, balance hídrico, erosión del suelo y colonización de especies invasoras (Bone y Dragicevic, 2009). Por lo tanto, los cambios

en la cobertura terrestre requieren de un monitoreo continuo y un análisis simultáneo desde un enfoque multitemporal como vía para comprender los patrones de cambio y los factores que los provocan.

Geomática y Sistemas de Información Geográfica

Como ya se mencionó anteriormente, la caracterización multitemporal tiene implícito el monitoreo del comportamiento de variables espaciales en el tiempo. Para comprender las herramientas conceptuales y tecnológicas que permiten que se lleve a cabo dicho monitoreo es necesario establecer las bases teóricas. En primer lugar, debe mencionarse que la modelación del paisaje inició con el sedentarismo al establecer sus cultivos, criar y alimentar ganado, y eventualmente, ir construyendo grandes urbes y extensas vías de comunicación. Sin embargo, la tierra disponible es finita, por lo que poco a poco el hombre se vio obligado a conocer la distribución que tenía en el territorio, conocer los recursos con los que contaba y plantear posibles ordenamientos territoriales. Este fue uno de los motivos que fomentó al establecimiento de la Geografía como disciplina de estudio. De acuerdo con Baxendale (2010), la Geografía como ciencia pura implica saber que estamos considerando un cuerpo de conocimientos racionales, sistemáticos, organizados, verificables, y sin embargo, falibles que fueron adquiridos por un método específico y que buscan establecer regularidades y generalidades en relación a las manifestaciones espaciales de la relación entre el hombre y su ambiente. Estas generalidades permitirían llegar a explicar y predecir patrones de localización, distribución, asociación, interacción y evolución de fenómenos sobre el territorio (Baxendale, 2010). Por otra parte, una subdisciplina que es importante conocer para los fines de la presente investigación es la geografía humana, que de acuerdo con Pillet (2004), maneja tres corrientes distintas que son la geografía humanística fenomenológica, la geografía humanística existencial y por último, la geografía humanística idealista, siendo ésta última de nuestro interés particular. La geografía humanística idealista recuperó el enfoque histórico, a la vez que se centró en el estudio del paisaje como resultado directo de la acción del hombre (Pillet, 2004).

En este sentido, los geógrafos, en un intento de entender e interpretar el mundo de forma más eficiente, han conjuntado sus esfuerzos con especialistas en geomática, traduciendo sus inquietudes a un nuevo lenguaje y abordando sus problemas desde nuevas perspectivas teórico-metodológicas, aprovechando así las múltiples posibilidades que ofrecen hoy en día ciencias emergentes y de evolución acelerada como SIG, cartografía digital y PR (Levi, 2006).

Cuando se habla de Geomática debe tenerse muy presente que no se está hablando de una fuente de técnicas ni herramientas para estudiar el territorio, sino que ésta es una disciplina científica que forma toda una estructura de pensamiento que emerge de la necesidad de estudiar y comprender el espacio geográfico. En este sentido, Tapia (2014) menciona que la Geomática es una disciplina que enriquece el sistema de pensamiento, donde no son importantes las fronteras entre las partes ni definir el origen preciso de las aportaciones que integran su marco conceptual, sino que se conforma como una unidad orientada a dar

soluciones integrales que presenta la sociedad, mismas que se aborda generalmente desde un marco teórico-metodológico, asociado con el análisis espacial. Así, La geomática emerge en el espacio convergente de otras disciplinas previas, como SIG, cartografía, PR, geodesia y fotogrametría (Tapia, 2014). Asimismo, Gomarasca (2009) define a la Geomática como un enfoque sistemático, multidisciplinario e integrado para la selección de técnicas e instrumentos apropiados para la colecta, almacenamiento, integración, modelado, análisis, transformación, exhibición y distribución espacialmente georreferenciada de datos desde diferentes fuentes con características bien definidas en precisión y continuidad en un formato digital (Gomarasca, 2009).

Una vez entendida a la geomática como una ciencia integradora, se describirá el contexto de las disciplinas que convergen en ella. En primer lugar, y por nivel de relevancia hablaremos de los sistemas de información geográfica (SIG), pues estos constituyen un importante eje de integración de las demás disciplinas de la geomática (Tapia, 2014). Elementos provenientes de la teoría general de sistemas de análisis espacial (incluida la geoestadística), de otras disciplinas emergentes como cibercartografía y visualización computacional, geocomputación, geodesia, modelaje cuantitativo y cualitativo y percepción remota, se integran en mayor o menor medida en los SIG. Esto implica que los sistemas de información geográfica requieren integrar una vasta cantidad de elementos provenientes de otras disciplinas que permiten el registro, análisis y visualización de los fenómenos asociados con el territorio (Tapia, 2014)

En este sentido, el primer Sistema de información Geográfica formalmente desarrollado aparece en Canadá, al auspicio del Departamento Federal de Energía y Recursos. Este sistema, denominado CGIS (Canadian Geographical Information Systems), fue desarrollado a principios de los 60 por Roger Tomlinson, quien dio forma a una herramienta que tenía por objeto el manejo de los datos del inventario geográfico canadiense y su análisis para la gestión del territorio rural. El desarrollo de Tomlinson fue pionero en este campo, y se considera oficialmente como el nacimiento del SIG. Es en este momento cuando se acuña el término, y Tomlinson es conocido popularmente desde entonces como el padre del SIG (Olaya, 2011)

Simultáneamente a los trabajos canadienses, se produjeron desarrollos en Estados Unidos, en el seno de Harvard Laboratory, y en el Reino Unido dentro de la Experimental Cartography Unit. Ambos centros se erigieron también como principales desarrolladores de *software* para la producción, manejo y análisis de información geográfica durante aquellos años (Olaya 2011).

Sin embargo, la primera experiencia relevante en esta dirección la encontramos en 1959, cuando Waldo Tobler definió los principios de un sistema denominado MIMO (map in-map out) con la finalidad de aplicar los ordenadores al campo de la cartografía. En él, establece los principios básicos para la creación de datos geográficos, su codificación, análisis y representación dentro de un sistema informatizado. Estos son los elementos

principales del software que integra un SIG y que habrán de aparecer en todas las aplicaciones realizadas desde ese momento (Olaya, 2011).

De esta manera es como los Sistemas de Información Geográfica fueron mejorados hasta convertirse en sistemas que integran tecnología informática, personas e información geográfica y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados (Olaya, 2011). De esta manera, los sistemas de información geográfica son capaces de integrar información georreferenciada, tecnologías y personas en un mismo sistema (Olaya, 2011).

Percepción remota y análisis espacial

Con respecto al rol que tienen los sistemas de información geográfica como integradores de información y tecnología resalta la percepción remota como una vasta fuente de información georreferenciada y monitoreada en forma sinóptica (con fechas establecidas de revisita de los satélites y con el mismo cubrimiento en cada revisita). En este sentido, la percepción remota aparece inicialmente durante las primeras misiones interplanetarias de sondas espaciales no tripuladas. A bordo de éstas se instalaron cámaras de televisión para la captura y envío a la Tierra de imágenes correspondientes a regiones selectas de la superficie de otros planetas. Esta tecnología, con el tiempo comenzó a utilizarse para registrar datos sobre la superficie terrestre. De ahí que la percepción remota se haya definido en su desarrollo histórico, como la obtención de información, acerca de una superficie o escena, utilizando luz visible e invisible, por medio del análisis automatizado de datos obtenidos a distancia por un sensor remoto (Lira, 1995)

En lo que concierne a la percepción remota aplicada, González (2004) menciona que la historia de las ciencias de la Tierra comenzó poco después de la invención de la cámara fotográfica. Ya, hacia 1840 se tenían las primeras fotografías aéreas tomadas desde globos aerostáticos y para finales del siglo, se diseñaron cámaras para que palomas mensajeras las portaran y así registrasen imágenes desde cierta altura.

En el presente siglo, la fotografía aérea tuvo un fuerte desarrollo durante la Primera Guerra Mundial y mucho más aún durante la Segunda Guerra Mundial, por obvias razones. El uso de cámaras en el espacio exterior comenzó con el Sputnik en 1957. Los primeros cosmonautas llevaban consigo cámaras fotográficas. Para la década de los 60 aparecen los primeros sensores montados en satélites meteorológicos (González, 2004).

Hacia 1970 se lanza Skylab, el primer laboratorio espacial concebido como un sistema que permitiría tomar información de una manera programada. En esa misma década se lanza el satélite Landsat dedicado exclusivamente a monitorear al planeta con la finalidad de realizar cartografía sobre los recursos naturales (González, 2004).

De manera concreta, la percepción remota es el medio por el cual se observa a la superficie terrestre usando diferentes tecnologías como la fotografía aérea o los satélites espaciales

(Chuvieco, 1995). Con la percepción remota es posible adquirir a distancia información cuantitativa y cualitativa sobre cualquier lugar y medio ambiente, así como la combinación de métodos y técnicas para su posterior elaboración e interpretación (Gomasasca, 2009). La percepción remota no obtiene información directa del medioambiente, sino que recoge información electromagnética que se convierte en estimaciones de variables químicas, biológicas y físicas mediante la creación de sistemas multidisciplinarios. La veracidad de las estimaciones depende de los modelos y algoritmos desarrollados para extraer parámetros del continuo de datos ópticos-espectrales recolectados de los sensores remotos en comparación con los datos de referencia de la superficie (Gomasasca, 2009).

Para el interés particular de esta investigación, nos enfocaremos en la radiación electromagnética que proviene del Sol y se manifiesta como luz visible, que es un continuo de ondas que se caracterizan por su tamaño (longitud de onda, λ , que se mide en micrómetros) y frecuencia (n , que se mide en Hertz), el número de ondas por unidad de tiempo. Mientras más pequeña es la longitud de onda más alta es la frecuencia. Las longitudes de onda importantes para la percepción remota son la luz visible ($0.38\mu\text{m}$ - $0.78\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}=10^{-3}\mu\text{m}$), el infrarrojo cercano ($0.7\mu\text{m}$ - $0.9\mu\text{m}$), infrarrojo de onda corta ($1.3\mu\text{m}$ – $2.5\mu\text{m}$), infrarrojo medio (en torno a $3.7\mu\text{m}$) infrarrojo térmico ($8\mu\text{m}$ - $14\mu\text{m}$) y la radiación en microondas (mayor a $15\mu\text{m}$) (González, 2004) (Piedra, 2005) .

La radiación electromagnética que llega a un objeto puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Así, cada uno de estos tipos de radiación es diferente para cada superficie en función de la longitud de onda (González, 2004). Lo anterior hace posible identificar los objetos de acuerdo a sus propiedades espectrales.

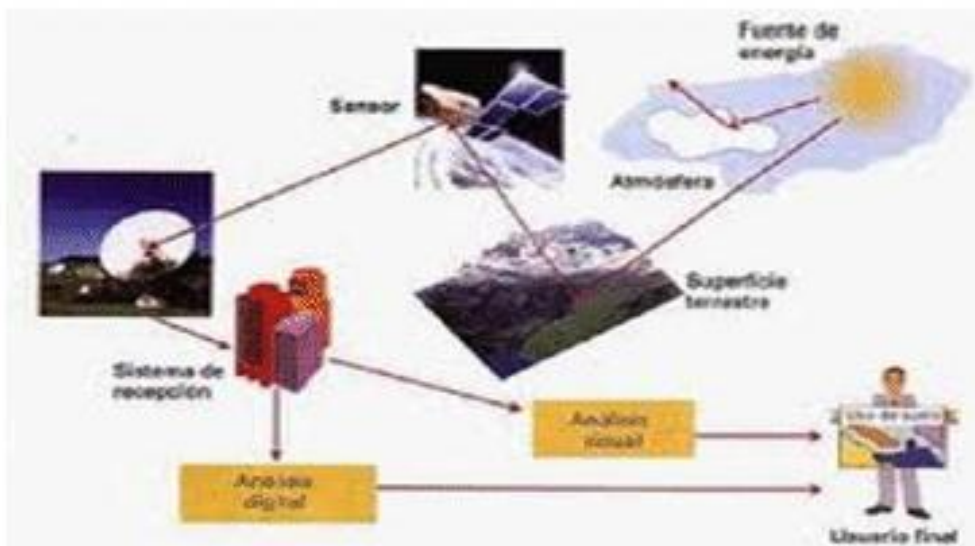


Figura 1. Sistema de Percepción Remota (Fuente: Ancari-Villcarani, 2011).

Un sistema de PR incluye los siguientes elementos: 1) Fuente de energía (el Sol para

sensores pasivos); 2) Cubierta terrestre que reciba la señal energética procedente del sol y la refleje, transmita o absorba de acuerdo a sus características físicas (vegetación, suelo, agua o construcciones humanas); 3) Sistema sensor, que capta la energía procedente de la cubierta terrestre, la codifica y graba o la envía directamente al sistema de recepción; 4) sistema de recepción y comercialización; 5) Intérprete, que analiza la información (en forma de imágenes analógicas o digitales), convirtiéndola en una clave temática o cuantitativa, orientada a facilitar la evaluación del problema en estudio y 6) Usuario final es quien analiza el producto final (Chuvieco, 1995).

Para que un sensor remoto pueda o no detectar las diferencias espectrales de un objeto con respecto a otro depende de lo siguiente: 1) la resolución radiométrica del sensor, 2) la cantidad de dispersión atmosférica, 3) lo irregular de la superficie del objeto y 4) la variabilidad espacial de los objetos en escena (González, 2004).

Las imágenes pueden ser caracterizadas de acuerdo a los tipos de resolución, mismo que dependen del sensor y de la plataforma como binomio operativo y de las características propias de ambos. Se distinguen cuatro tipos (Olaya, 2011):

Resolución espacial: Es la dimensión del objeto más pequeño que puede distinguirse en la imagen, lo que equivale al tamaño del píxel. La resolución espacial depende de la capacidad resolutoria del sensor y características de la plataforma, como la altura a la que se sitúa.

Resolución espectral: Todo sensor cubre una región particular del espectro y almacena un número dado de bandas. La región del espectro abarcada y el número de bandas son los elementos que definen la resolución espectral. Así, a mayor número de bandas, mayor resolución, ya que cada una cubrirá un rango de frecuencias de menor amplitud.

Resolución radiométrica: está asociado al nivel de detalle con el que puede medirse la intensidad de la región del espectro de cada banda, lo que constituye el nivel digital para cada una de ellas.

Resolución temporal. Es el tiempo que tarda cada sensor en volver a tomar una imagen de una misma zona, lo que tiene sentido para los sensores satelitales, pues barren una franja del planeta cada cierto tiempo.

Respecto a la dispersión atmosférica es necesario saber que la radiación electromagnética se ve afectada por la presencia de aerosoles y vapor de agua en la atmósfera, que dispersa de forma selectiva la radiación transmitida entre la superficie terrestre y el sensor. El principal problema es que esta dispersión es su carácter heterogéneo, en el espacio y en el tiempo. Además, el efecto depende de la longitud de onda y varía entre imágenes de forma difícil de predecir (Chuvieco, 1995). Para reducir los posibles errores en las imágenes resultantes se han desarrollado métodos para la corrección atmosférica. La

corrección atmosférica es un procedimiento destinado a limpiar la señal de absorción atmosférica y los efectos de dispersión, también incluye la calibración radiométrica y la normalización de los efectos debido a la geometría del sistema (Gomasasca, 2009). No existe un método único para realizar las correcciones atmosféricas. Sin embargo, los que ya existen pueden clasificarse en dos grupos: 1) Modelos basados en la física de la transferencia radiativa y 2) Método basado en las imágenes (Gomasasca, 2009). En la primera categoría se incluyen los modelos que resuelven la ecuación de transferencia de energía electromagnética a través de la atmósfera. Para describir con precisión la propagación de la radiación, estos modelos necesitan mediciones in situ de la colección de las propiedades ópticas de la atmósfera adquiridas al mismo tiempo que la adquisición de la escena. Esto hace que las evaluaciones sean más precisas, aunque son complicadas y costosas (Gomasasca, 2009). En cambio, en la segunda categoría se recupera la información sobre las propiedades atmosféricas basándose en la información de las imágenes. Estos procedimientos son menos precisos (Gomasasca, 2009). El método utilizado para realizar la corrección atmosférica en el presente trabajo pertenece a la primera en esta segunda categoría, en donde se desarrolló un algoritmo llamado *6s*. Este algoritmo es un código de transferencia radiativa avanzada, diseñada para simular la reflexión de la radiación solar por un sistema atmósfera-superficie acoplada para una amplia gama de condiciones atmosféricas, espectrales y geométricas. Este es un proceso de eliminación de los efectos de la atmósfera en los valores de reflectancia de imágenes satelitales o por sensores aerotransportados (Kotchenova et. al, 2006).

Por lo que se refiere a la irregularidad de la superficie de la cobertura terrestre, González (2004) menciona que las clases de cobertura terrestre pueden agruparse en tres conjuntos: suelo desnudo, agua y vegetación. La reflectancia de los suelos desnudos está determinada por el contenido de humedad superficial, la composición mineral, el contenido de materia orgánica, la textura y la rugosidad. Las características espectrales del agua varía según el contenido de partículas o sedimentos, materia orgánica, material vegetal y profundidad (González, 2004). En cuanto al comportamiento espectral de la vegetación depende de las propiedades de las hojas y la estructura del dosel de la vegetación (número de capas de hojas y la orientación de las mismas (González, 2004).

En el presente estudio se utilizaron cuatro tipos de sensores: SRTM, Landsat 5, Landsat 8 y MODIS. A continuación se describirán las características básicas de cada uno de estos satélites:

SRTM: La misión SRTM está destinada a la creación de una cobertura de elevaciones a nivel mundial. En esta misión se utilizaron sensores basados en radar montados sobre un transbordador espacial. La resolución de los datos obtenidos es de 90 metros (Olaya, 2011).

MODIS: Es un instrumento clave a bordo de los satélites *EOS AM-1* y *EOS PM-1*. Estos satélites recorren la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo los datos a partir de 36 bandas espectrales. La resolución es de 1000m, 500 m y 250. MODIS está activo desde el año

2000.

Landsat 5: Tiene una resolución temporal de 16 días. El sensor TM ofrece imágenes multibanda de 7 bandas con resolución de 30 metros, excepto en la banda del infrarrojo térmico, que la resolución es de 120 metros. Las imágenes tienen un tamaño de 185 x 173 km (Olaya, 2011).

Landsat 8: Tiene dos sensores de observación (OLI y TIRS), que recogen los datos de forma conjunta. El sensor OLI, además de tener los sensores de sus antecesores, tiene un canal profundo en el azul visible y un nuevo canal infrarrojo, lo que proporciona información más detallada sobre las características de nubes, agua y nieve. La calidad de los datos y la resolución radiométrica (12 bits) es más alta que los instrumentos anteriores de Landsat, proporcionando una mejora significativa. Tiene 11 bandas en total (Ariza, 2013).

Las ventajas que presenta Landsat frente a otras fuentes de percepción remota es que ha recopilado información desde hace 40 años, lo que implica una vasta colección de imágenes satelitales que proporcionan información valiosa a través del tiempo.

Sin duda, la percepción remota es una disciplina básica para la geomática y el estudio de los problemas territoriales que ocurren en nuestro planeta, pues permite aumentar la perspectiva que tenemos de los fenómenos que ocurren en nuestro planeta al estar dentro de la órbita terrestre.

Una de los procedimientos importantes que se realizan para caracterizar el espacio geográfico es la *clasificación*. El proceso de clasificación convierte una serie de capas en otra única con información categórica. Este proceso tiene tres etapas: 1) Definición de clases, 2) Asignación de cada elemento a una de dichas clases y 3) validación de la clasificación (Olaya, 2011).

La clasificación por máxima probabilidad se basa en fundamentos estadísticos. Conociendo la media y desviación típica que caracteriza a una clase, se estima la función de densidad de probabilidad, y con los valores de un elemento dado se evalúa la probabilidad de que estos correspondan a cada clase. La clase con una mayor probabilidad es aquella a la que se le asigna el elemento (Olaya, 2011).

Cuando se clasifican un conjunto de capas en clases, se puede contrastar el resultado obtenido si se dispone de zonas conocidas de antemano. Al comparar los valores de clase de las zonas de comparación y los obtenidos mediante la clasificación se obtiene los índices de concordancia que permiten juzgar la corrección de dicha clasificación. El índice de kappa utiliza los valores de la matriz de clases, ya que tiene en cuenta la posibilidad de que exista concordancia al azar (Olaya, 2011).

El índice kappa es un indicador de validación de clasificación que puede tomar valores desde -1 a 1. El valor 1 indica una concordancia completa, el -1 define una correlación

negativa. Los valores alrededor de 0 indica que no existe correlación entre las capas (Olaya, 2011). Cuando el índice kappa tiene valor de 1 se trata de una coincidencia perfecta. Cuando es mayor a 0.75, la coincidencia es muy buena. Si el valor de kappa oscila entre 0.4 y 0.75, la coincidencia va de intermedia a buena. Pero, si el valor de kappa es menor a 0.4, no se considera una clasificación válida (Monserud y Leemans, 1992). El coeficiente kappa se estima mediante una matriz de confusión. Una matriz de confusión se construye a partir del conjunto de puntos para los que se conoce la clase que se les ha asignado en el proceso clasificatorio y la clase real a la que pertenecen. Estos datos se representan en una matriz bidimensional cuadrada donde cada columna representa una categoría resultado de la clasificación y cada fila hace referencia a una clase real. Los elementos de la diagonal se refieren a la cantidad de cada clase que han sido clasificados correctamente, mientras que el resto de elementos indican no sólo la cantidad de puntos incorrectamente clasificados sino también a que clases han sido incorrectamente asignados. Los puntos que fueron incorrectamente clasificados pueden dividirse en dos tipos: errores de omisión y errores de comisión. El error de omisión lo conforman los elementos de una misma fila, exceptuando a los de la diagonal, indican el número de puntos que perteneciendo a una misma clase fueron asignados a clases diferentes. Por otro lado, el error de comisión son los elementos de una misma columna, excepto los elementos de la diagonal, reflejan el número de puntos que fueron asignados a una clase cuando en realidad pertenecen a otras clases (Sobrino et al., 2000).

Una herramienta para visualizar las distintas áreas con algún elemento particular para la clasificación del terreno es la composición de imágenes. Las imágenes digitales se dividen en bandas, denominadas canales, cada una de las cuales contiene la información sobre un color lo espectro electromagnético concreto. Los más frecuentes son los colores rojo, verde y azul (Olaya, 2011). Al realizar la composición de color con estos tres colores, resulta una imagen con la tonalidad real del terreno fotografiado. En el caso del sensor Landsat TM se emplean las bandas 3 (rojo), 2 (verde) y 1 (azul) (Olaya, 2011).

En cuanto al análisis espacial, Tapia y otros (2013) afirman que este puede proveer de valiosas herramientas conceptuales y prácticas para lograr una utilización mejorada de la información medida en campo y por satélites para apoyar la toma de decisiones. Asimismo, mencionan que las técnicas de análisis espacial permiten incrementar el potencial de uso en cuanto a representatividad espacial y contenido de información de los datos provenientes de campo y de satélites. Estos mismos autores indican que estas técnicas posibilitan la generación de esquemas de generación de superficies (mapeo) de la información disponible, incluso mediante el uso de información adicional, que aportan valor a la misma información original y mejoran sus cualidades de representatividad espacial.

Por su parte, Olaya (2011), menciona que el análisis espacial permite cuantificar a los fenómenos que se manifiestan en el espacio. Este análisis puede retomar los datos de posición, superficie, distancia e interacción de los elementos a través del espacio mismo, aunque para que tenga sentido en el ambiente de los SIG's, todos estos datos deben estar referenciados espacialmente (Olaya, 2011). Así, el análisis espacial debe entenderse como una colección de procesos que trabajan los datos espaciales (Olaya, 2011).

El análisis espacial puede englobarse en diferentes tipos de procesamiento, como: 1)

Consulta espacial, 2) Análisis topológico, 3) Medición, de distancia, área, perímetro o forma, 4) Combinación o superposición de capas de información, lo que facilita el análisis sobre diversas variables, 5) Transformaciones a partir de procedimientos que modifican los elementos de entrada de diversas formas, las transformaciones pueden ser geométricas o de tipo cartográfico, 7) Análisis de superficies, 8) Estadística descriptiva de los datos espaciales que permiten calificar cuantitativamente los datos espaciales e 9) Inferencia de comportamientos de las variables en el tiempo (Olaya, 2011).

Adicionalmente, Gomasasca (2009) menciona que el análisis integrado requiere de funciones que involucren a la geometría y los atributos que caracterizan al tema en cuestión, los cuáles pueden ser divididos en cuatro categorías:

Selección, clasificación y funciones de medición: Estas funciones sólo son de consulta no cambian ni la geometría, ni los atributos (Gomasasca, 2009).

Geoproceso y funciones de cruce: Las capas son procesadas juntas para obtener nuevos datos resultantes de operaciones de fusión, intersección, exclusión, unión, etc. Esto genera nueva información, tanto en la geometría como en el nivel de atributos (Gomasasca, 2009).

Herramientas del vecino más cercano: Es útil para evaluar el comportamiento de las porciones de mapas cercanas a una posición específica mediante cuatro tipos de operadores: funciones topográficas, herramientas de iluminación, herramientas de vista en perspectiva y herramientas de interpolación (Gomasasca, 2009).

Herramientas de conectividad: es útil para identificar los segmentos de una red (de polígonos o líneas) conectada (Gomasasca, 2009).

Una de las herramientas de análisis espacial importante en este trabajo es la interpolación, la cual permite el cálculo de valores en puntos no muestreados, a partir de los valores recogidos en otra serie de puntos (Olaya, 2011). En el presente estudio se utilizó la interpolación mediante curvas adaptativas (*spline*). Este tipo de interpolación conforma una familia de métodos de interpolación exactos, determinísticos y locales. Desde un punto de vista físico pueden asemejarse a situar una superficie elástica sobre el área a interpolar, fijando está sobre los puntos conocido, creando superficies suaves, cuyas características pueden regularse modificando el tipo de curva empleada o los parámetros de esta (Olaya, 2011). Desde el punto de vista matemático, los splines son funciones polinómicas por tramos, de tal modo que en lugar de emplear un único polinomio para ajustar a todo un intervalo, se emplea uno distinto de ellos para cada tramo. Las curvas definidas por estos polinomio se enlazan entre ellas en los denominados nudos, cumpliendo unas condiciones particulares de continuidad (Olaya, 2011).

Hasta este punto es evidente que, el análisis espacial es fundamental para que lo sistemas de información geográfica tengan el alcance que poseen, ya que de la información obtenida mediante percepción remota, el procesamiento de los datos primarios y al análisis de los mismos, se pueden llegar a deducciones mucho más profundas y con mayor influencia.

Cobertura terrestre

Conceptos: Cobertura terrestre y Uso de suelo

La FAO (2005) define a la *cobertura terrestre* como la cobertura biofísica que se observa sobre la superficie de la Tierra. Este concepto considera a cualquier elemento que está sostenido sobre la tierra y los afloramientos rocosos, ya sea de origen natural o humano.

Ahora bien, la cobertura terrestre es un conjunto de elementos heterogéneos, que pueden ser clasificados y jerarquizados de acuerdo a las necesidades de cada investigación, pero para el interés particular de este estudio, el área está acotada a la extensión de la cuenca Usumacinta (de la cual se hablarás con más detalle en el subtema 1.6.1 de este capítulo) y la cobertura terrestre de esta zona, está planteada en tres conjuntos: cobertura vegetal, cobertura hídrica y cobertura de origen humano.

En primer lugar, la cobertura vegetal debe entenderse como el conjunto de especies vegetales que crecen juntas en una localidad particular y presentan una asociación y afinidad entre ellas, que al interactuar junto con otros elementos bióticos y abióticos conforman a los ecosistemas terrestres.

Cuando se hace referencia al uso de suelo, se hace alusión a aquellas fracciones de terreno que están destinadas a ciertos arreglos, actividades e insumos que el hombre emprende en un cierto tipo de cobertura de la tierra para producir, cambiarla o mantenerla (Di Gregorio y Jansen, 2005).

El cambio de cobertura terrestre se refiere al proceso dinámico de *sucesión ecológica* en el que ocurren cambios progresivos de la comunidad biótica en el ecosistema a través del tiempo. Los cambios que se presentan en la comunidad van de lo simple a lo complejo en esta secuencia: rocas desnudas, líquenes, hongos, helechos, pastos, hierbas, arbustos, matorrales y árboles (López *et al.*, 2006). Así, la sucesión ecológica primaria se presenta en lugares inhóspitos donde la vida ha sido exterminada. Por otra parte, la sucesión ecológica secundaria es la regeneración natural después de la destrucción de la comunidad biótica (mediante tala, incendio, sobrepastoreo, acciones antropogénicas como las tierras de cultivo abandonadas) (López *et al.*, 2006). Por otra parte, el cambio de uso de suelo implica el cambio de cobertura por otra de forma intencionada. En muchos casos se suele destruir la vegetación natural para darle uso agrícola (deforestación) o pastoreo, lo que induce al terreno a la desertificación (Lambin *et al.*, 2003).

Para concretar, el cambio de cobertura terrestre es un fenómeno dinámico en el espacio y el tiempo. Sin embargo, la tasa de cambio como un proceso natural permite que los ecosistemas vayan encontrando por sí mismos el equilibrio y la estabilidad en sus interacciones entre los elementos bióticos y abióticos a nivel local, regional y global. En cambio, cuando el cambio de cobertura terrestre ocurre de manera acelerada y tiene la

intervención de las actividades humanas, se rompe el equilibrio antes mencionado y se incide sobre elementos esenciales en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres a nivel regional y también altera los ciclos naturales a nivel global.

Cambios de Cobertura terrestre a nivel global y nacional

Además, Lambin y otros (2003) al realizar sus estudios sobre el cambio de cobertura terrestre a nivel global, formularon términos complementarios que ayudan a comprender los matices en el proceso de transformación de la cobertura terrestre. Estos términos son: 1) *Conversión de cobertura terrestre*. Es el completo reemplazo de una cobertura por otra y 2) *Modificación de cobertura terrestre*. Son cambios más sutiles que afectan el carácter de la cobertura terrestre sin cambiar la cobertura por completo (Lambin *et al.*, 2003).

Esto significa que cuando la cobertura terrestre adquiere un interés particular para los humanos, el área territorial en cuestión se destina a satisfacer, parcial o completamente, nuestras necesidades y deseos, lo que ha provocado un gran deterioro de los recursos naturales en el tiempo. La investigación de Lambin y otros (2003) tuvo el objetivo de entender la complejidad de los problemas implicados en el cambio de cobertura terrestre. En dicho estudio se menciona que los recientes cambios en la cobertura forestal propician la deforestación, lo que implica que los bosques son convertidos en otra cobertura o la cubierta forestal cae por debajo de un umbral mínimo (10% para las naciones unidas). Además, los autores mencionan que el cambio de cobertura terrestre emerge como tema de investigación a escala global a mediados de 1970. En ésta época se reconoció que el cambio de cobertura terrestre altera el albedo, y por tanto, se altera el intercambio de energía entre la superficie y la atmósfera, lo que tiene impacto en el clima regional. Poco después, en 1980, los ecosistemas terrestres se conciben como importantes sumideros de carbono (Lambin *et al.*, 2003) que menguan el volumen de dióxido de carbono en la atmósfera, que contribuye con el cambio climático. Estos dos enfoques ilustran el siguiente hecho: La importancia que le damos a la cobertura terrestre cambia o se enriquece de acuerdo con la capacidad que tenemos para adquirir conocimiento y también responde al contexto social y los intereses del momento. No obstante, Lambin y otros (2003) sugieren que entender las causas del cambio de uso de tierra, requiere entender las interacciones que envuelven la situación específica entre un largo número de factores en diferentes escalas espaciales y temporales.

En un contexto histórico, Lambin y otros (2003) mencionan que hace 8000 años, la cobertura forestal cubría el 50% de la Tierra, lo que contrasta con el 30% que cubre actualmente. La agricultura, por su parte, se ha expandido en bosques, sabanas y estepas en todo el mundo, debido a la demanda de alimento y fibras. Además, en dicho estudio explican que los cambios históricos respecto a la cobertura terrestre a escala global sobre los pasados 300 años fue de la siguiente manera: 1) Bosques: En 1700 había entre 5000 y 6200 10^6 ha, mientras que en 1990 había entre 4300 y 5300 10^6 ha. 2) Estepa/Sabana/Pastizal: En 1700 había 3200 10^6 ha, mientras que en 1990 había de 1800 a

2700 10⁶ ha. 3) Tierra de Cultivo: En 1700 había de 300 a 400 10⁶ ha, mientras que en 1990 había de 1500 a 1800 10⁶ ha. Y 4) Pastizal: En 1700 había de 400 a 500 10⁶ ha, mientras que en 1990 había de 3100 a 3300 10⁶ ha. Estos datos muestran que los bosques y los pastizales son las coberturas que han disminuido en el tiempo, mientras que aquellas coberturas que satisfacen necesidades económicas, como lo son la agricultura y las áreas de pastoreo han aumentado exponencialmente en el tiempo. Con respecto a la cobertura urbana, estos autores mencionan que las poblaciones urbanas han crecido más rápidamente que las poblaciones rurales en el mundo, particularmente en los países desarrollados (Lambin *et al.*, 2003)

Adicionalmente, la FAO ha monitoreado los bosques del mundo desde 1946, mediante las evaluaciones de recursos forestales mundiales. Dicha evaluación se basa en los informes nacionales y estudios de PR realizados por la FAO (FAO, 2017). Los resultados más relevantes para la evaluación del 2010 fueron: El área de bosque a nivel mundial era de 4000 millones de hectáreas, aunque la distribución en el planeta no es homogénea. Los países con mayor riqueza forestal fueron Rusia, Brasil, Canadá, Estados Unidos y China. Estas naciones poseen el 53% de la cobertura forestal, mientras que el otro 47% de la cobertura forestal se encuentra en el resto del mundo (FAO, 2010). Sin embargo, en la evaluación de los recursos forestales mundiales se determinó que durante los primeros diez años del siglo XXI, cerca de 13 millones de hectáreas anuales de bosque se transformaron para otros usos de suelo, principalmente agrícola, o se perdieron por causas naturales. Este resultado es ligeramente alentador, puesto que dicha evaluación también menciona que en la década de los 90 se perdieron 16 millones de hectáreas anuales (FAO, 2010). Esta reducción se debió a que disminuyó la tasa de deforestación y a que aumentó la repoblación, natural o inducida, de los bosques. También en este estudio se menciona que anualmente la reforestación fue de 367 mil hectáreas anuales, lo que equivale a una tercera parte del área pérdida por deforestación (FAO, 2010). Esto quiere decir que los esfuerzos por recuperar las zonas forestales no son suficientes.

En el caso particular de México, la CONABIO (2009) compiló información muy importante que describe el capital natural de nuestro país, donde mencionan que México ocupa el decimoprimer lugar en términos de superficie forestal. Sin embargo, aunque México tiene una enorme diversidad de especies maderables, su explotación comercial depende fundamentalmente de especies de Pinos (CONABIO, 2009), lo que implica que el manejo forestal está siendo subutilizado y que se desperdicia la madera a consecuencia del cambio de uso de suelo (CONABIO, 2009).

En un estudio posterior, Céspedes y Moreno (2010) recopilaron la información de diversos estudios que estimaron la tasa de deforestación en el país, así como su proporción de las áreas reforestadas. En dicha investigación mencionaron que en México, durante el período 1976-1993 se perdieron 2 976 500 Ha de bosque, mientras que durante el período 1993-2000 la pérdida fue de 5 430 6000 Ha, lo que hace evidente el aumento en la tasa de deforestación en nuestro país. Por otra parte, durante el período 2000-2005, la tasa

promedio de deforestación fue de 314 mil hectáreas anuales. Así, México sólo cuenta con 10% de selvas y 50 % de bosques templados de las superficies originales (Céspedes y Moreno, 2010).

Tipos de Cobertura terrestre en la cuenca Usumacinta

En la cuenca Usumacinta las comunidades vegetales más representativas son las selvas altas perennifolias, selva baja espinosa subperennifolia, manglares, tulares y pastizales (CONANP, 2015) (INEGI, 2001). La selva alta perennifolia es la más rica y compleja de todas las comunidades vegetales. En esta comunidad predominan los árboles siempre verdes de más de 25 m de alto. Por lo común no todos los componentes son estrictamente perennifolios, pues algunas especies pierden sus hojas en la temporada seca, pero el bosque nunca pierde totalmente su verdor (Rzedowski, 2006). La información provista en los tipos de vegetación en la cuenca Usumacinta se obtuvo de la anterior cita. El número de especies que componen el estrato superior de las selvas altas es por lo general grande y a menudo no se puede distinguir el árbol dominante. En Chiapas son varias las especies dominantes y tienen un mayor número de especies de árboles que integran al bosque en comparación con respecto al resto de las selvas altas de San Luís Potosí. El diámetro de los troncos de los árboles oscila entre 40 y 80 cm, aunque también pueden alcanzar diámetros de hasta 2 m. Las copas de los árboles suelen ser piramidales achatadas o más o menos esféricas. Las hojas de los árboles son en general mesófilas, de textura coriácea y con coloración oscura. El estrato superior mide más de 30 m con individuos de más de 45 m de alto. No suelen formar un techo cerrado, sino que consiste en eminencias más o menos aisladas. Los otros dos estratos arbóreos tienen alturas de 5 y 20 m, las copas suelen ser piramidales y las hojas son más oscuras que en el dosel superior. En las selvas altas perennifolias el volumen de ramas y hojas mantiene a nivel de suelo condiciones microclimáticas de una penumbra acentuada y alta temperatura y humedad durante todo el año. La selva baja espinosa subperennifolia tiene comúnmente de 4 a 15 m de altura y, a menudo, tienen una formación densa a nivel de estrato arbóreo, aunque también pueden formar bosques abiertos o semiabiertos. Las especies adscritas a esta comunidad suelen ser caducifolias. En estas comunidades abundan las especies espinosas y con cierta frecuencia existen también cactáceas candelabrifórmes asociadas. El estrato arbustivo está en general bien desarrollado y es comúnmente rico en especies espinosas. Las comunidades más abiertas tienen numerosas plantas herbáceas, entre ellas muchas anuales. En la Depresión Central de Chiapas, la selva baja espinosa subperennifolia puede alcanzar hasta 15 m de altura, Esta asociación es propia de los terrenos con drenaje deficiente.

Los manglares son una comunidad vegetal que se distribuye en las regiones calientes, prospera en lagunas costeras y desembocaduras de ríos. El manglar es una formación leñosa, densa, frecuentemente arbustiva o bien, arborescente, de 2 a 25 m de altura. Las especies que lo componen son de hoja perenne. Los tulares son comunidades de plantas acuáticas monocotiledóneas de 1 a 3 m de alto, de hojas angostas o bien carentes de órganos foliares. Forman masas densas que cubren a veces superficies de áreas pantanosas

y lacustres y se encuentran también en orillas de zanjas, canales y remansos de ríos. Los tulares son cosmopolitas en su distribución.

Los pastizales son comunidades vegetales conformados por gramíneas. Los pastizales son generalmente de altura media (20 a 70 cm), la coloración es amarillenta la mayor parte del año y reverdece en la época de más humedad. En zonas de clima húmedo y semihúmedo los pastizales corresponden a una fase de sucesión de comunidades, cuya marcha es detenida. En otras ocasiones, los pastizales suelen ser persistentes cuando se trata de un terreno donde sufre disturbios constantes. El estrato herbáceo es rasante, formado principalmente por plantas rastreras. En la Depresión Central de Chiapas la mayor parte de las sabanas reviste probablemente origen secundario, pues se observan en ellas manchones de bosque tropical subcaducifolio que resisten la acción del fuego.

A pesar de la existencia de estos tipos de vegetación que son importantes para la dinámica de las cuencas, que ofrecen a la humanidad servicios ecosistémicos invaluable y que son insustituibles por su singularidad, la humanidad ha explotado y degradado estas comunidades vegetales sin control ni planeación en la mayor parte de los casos. En este sentido, el impacto de las actividades del hombre sobre la selva alta perennifolia ha sido intensa desde tiempos prehispánicos y ha ido en incremento en función de la explosión demográfica, de la apertura de vías de comunicación, del saneamiento del ambiente y otros factores. Dado el clima tropical, la agricultura puede darse todo el año sin necesidad de riego, por lo que las áreas ocupadas por selva alta perennifolia son muy atractivas para la agricultura. Sin embargo, las propiedades del suelo no son las adecuadas para la agricultura perenne. Esto provoca un fuerte impacto negativo, ya que se fomenta la agricultura seminómada y la continuidad de las prácticas de desmonte, incendio, siembra de maíz por algunas temporadas y luego el abandono de las tierras. Estas prácticas se han repetido una y otra vez, degradando sin control estas comunidades vegetales, fomentando el crecimiento de vegetación secundaria como los acahuals.

El impacto de las actividades humanas sobre la selva baja subperennifolia se debe al constante desmonte para abrir paso a terrenos para el cultivo de riego, lo que ha menguado la vegetación original. Entre los cultivos más frecuentes están: caña de azúcar, tomate, plátano, trigo, arroz, algodón cuando existe riego. La selva baja perennifolia tiene poco valor para la explotación forestal, aunque algunos árboles podrían usarse para la elaboración de carbón vegetal.

Los manglares son una comunidad vegetal que ha sido muy degradada, ya que son regiones frecuentemente taladas para la construcción de centros turísticos, que suelen no respetar las leyes que protegen a los manglares y al apostar por el mal manejo de las actividades turísticas generan la destrucción de zonas de alto valor estético del paisaje y la biodiversidad que albergan estas comunidades vegetales (Flores *et al.*, 2010)

Los pastizales son de suma importancia para la ganadería, pues el aprovechamiento de esta

comunidad vegetal se usa para el pastoreo, aunque la falta de regulación de esta actividad provoca un gran impacto negativo sobre este tipo de vegetación. Además, el sobrepastoreo y el pisoteo excesivo impiden el desarrollo y reproducción de las especies más nutritivas y apetecidas por el ganado y con frecuencia expone al suelo a la erosión. Estas comunidades suelen ser expandidas a costa de otros tipos de vegetación debido a intereses humanos.

Como ya se mencionó anteriormente, uno de las actividades humanas que más inciden sobre la vegetación natural es la expansión de la agricultura, lo que no solamente influye en la disminución de la vegetación, sino que también influye sobre el clima, el ciclo hidrológico, los ciclos de nitrógeno y carbono en la biosfera, las emisiones de gases de efecto invernadero y la biodiversidad (Paruelo *et al.*, 2005).

Por su parte, la cobertura hídrica es el agua superficial que se encuentra dentro de la cuenca hidrológica, ya sea en forma líquida o sólida. El agua corriente es el agente más importante que esculpe la superficie terrestre. Así, la cantidad de agua que corre por la superficie de la tierra depende de la capacidad de infiltración del suelo. Esto inicia la escorrentía en forma de láminas delgadas y anchas a través del suelo en un proceso que se llama escorrentía laminar. Después de cierta distancia, los hilillos de corriente suelen desarrollar diminutos cauces llamados acanaladores. Este proceso es aditivo, así que las pequeñas corrientes se unen hasta formar grandes caudales (Tarbuck y Lutgens, 2005). Por un proceso de gravedad y la topografía de la cuenca, las corrientes pueden ir a parar a lagos (perennes o intermitentes) o bien, pueden finalizar en la costa del mar. El impacto de las actividades humanas sobre los recursos hídricos pueden agruparse en tres tipos principalmente: La sobreexplotación de los recursos hídricos, la contaminación del agua y el desvío intencional de los cauces, lo que provoca un gran impacto en el funcionamiento de la cuenca.

En cuanto a la cobertura de origen humano, os referimos principalmente a las construcciones urbanas. Las ciudades han surgido como un símbolo de prosperidad y bienestar económico, en las cuales se ha tendido a centralizar los poderes políticos y económicos debido a lo fácil que resultan los intercambios comerciales de aquellos productos que se elaboran en otras regiones del país. Sin embargo, el crecimiento de las ciudades tiene implícito el proceso de conversión de las tierras de uso preferentemente natural o agrícola a uso urbano con una expansión horizontal, principalmente en la periferia de las ciudades. Normalmente, las personas con bajos recursos económicos son quienes se instalan en las periferias de las ciudades sin tomar en cuenta el plan de ordenamiento ecológico territorial, lo que resulta en un crecimiento urbano acelerado, disperso y desordenado (Soto, 2015).

Otro tipo de cobertura de origen humano que desplaza o destruye la cobertura vegetal natural son las carreteras. El principal objetivo de estas construcciones es fungir como vía de comunicación entre dos localidades, lo que contribuye con el crecimiento económico. No obstante, las carreteras tienen varios efectos adversos desde el punto de vista ecológico: 1) Dividen los ecosistemas, provocando el aislamiento de las poblaciones y limitan el flujo

genético entre los individuos de las poblaciones fragmentadas, 2) interfieren en los procesos naturales, 3) Dañan y contaminan los recursos naturales, tanto en el proceso de construcción de la carretera como en el tiempo de uso (Mo *et al.*, 2017). En conjunto, estos efectos aceleran la destrucción de los hábitats y la degradación de los ecosistemas, alteran el flujo de materia y energía entre dos sistemas distantes, intervienen en la evolución espacial de los bosques y alteran también los cauces de los ríos (Mo *et al.*, 2017). Al integrar todos estos elementos, es claro que aumenta el riesgo ecológico y la capacidad de los ecosistemas de prestar servicios básicos para el desarrollo de la humanidad.

Hasta este punto se han señalado dos factores importantes con respecto a la cobertura terrestre: 1) La naturaleza ha propiciado la formación de ecosistemas terrestres que no solamente albergan una gran biodiversidad, sino también contribuyen con el bienestar humano al ofrecer servicios ecosistémicos de los cuales depende nuestra calidad de vida y a su vez, la humanidad ha diseñado todo un sistema económico que se beneficia de la materia prima que se extrae de los ecosistemas presentes en las cuencas hidrológicas y 2) No solamente se ha fomentado la extracción exhaustiva de los recursos naturales, sino también se han sustituido comunidades vegetales naturales por otro tipo de vegetación o uso de suelo.

Ciclo hidrológico

Uno de los fenómenos asociados al cambio de cobertura terrestre es la alteración en los volúmenes de evapotranspiración, que es un proceso importante en el balance hídrico, tanto a nivel regional como global. Por ello se analiza en este el ciclo hidrológico.

En términos generales el ciclo del agua se efectúa entre el mar, la tierra y la atmósfera, intercambiando materia y energía. El ciclo hidrológico juega un papel crítico, ya que la precipitación junto con la temperatura se encargan de regular las condiciones atmosféricas a nivel global. Además, el agua en suficiente calidad y cantidad es absolutamente necesaria para la vida. De ésta depende la presencia de vegetación y desiertos (Lorenz *et al.*, 2007). Los componentes del ciclo del agua son: precipitación, intercepción, escurrimiento, evaporación, transpiración e infiltración. Cada uno de estos componentes presentan una gran variedad espacial y temporal (Mendoza *et al.*, 2002).

Como cualquier otro ciclo, el del agua puede comenzar a explicarse desde cualquier punto, porque es un proceso continuo. Por ello partiremos desde la intervención de la radiación solar que evapora el agua, principalmente de los océanos. El resultado es el vapor de agua que es transportado a la atmósfera que en condiciones favorables se convierte en precipitación. En la fase terrestre del ciclo del agua, la precipitación se acumula sobre la tierra y tiene diferentes destinos. Una parte puede ser interceptada por la vegetación y evaporada directamente de regreso hacia la atmósfera. Otra fracción es infiltrada por el suelo y es evaporada desde su superficie o transpirada por la vegetación. La fracción restante puede ser dirigida a la escorrentía o servir como recarga subterránea. De forma general, el ciclo se puede dividir en cuatro fases: precipitación, evapotranspiración,

escorrentía y almacenamiento (Zhang *et al.*, 2001).

El balance hídrico es basado en la ley de conservación de la de masa (Custodio *et al.*, 1997). Esto significa que cualquier cambio que ocurra en cualquier componente del ciclo hidrológico puede afectar al resto de los componentes del balance hídrico. Así, si hay precipitación, aumentará el volumen de agua en la superficie terrestre y el volumen de agua infiltrada en el suelo. Entonces, el agua subirá a las plantas por capilaridad y será transpirada por ellas, devolviendo el agua nuevamente a la atmósfera, otra fracción del agua contenida en el suelo será evaporada y el resto podría ser parte de la escorrentía superficial o formar parte del agua subterránea, y se repetirá el ciclo nuevamente.

Evapotranspiración

Esta investigación en particular se enfoca en el proceso de evapotranspiración, que ocurre cuando se combinan dos procesos separados: evaporación y transpiración. La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida dispuesta como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación mojada, se convierte en vapor de agua gracias a la energía de la radiación solar directa y en ocasiones, la temperatura ambiente del aire (Allen *et al.*, 2006). Con la evapotranspiración el aire circundante se va saturando de humedad, provocando que la tasa de evaporación disminuya en velocidad hasta detenerse. La evaporación podría trasladarse hacia la atmósfera, permitiendo que el aire seco que llegue por acción del viento detone nuevamente el proceso de evaporación. Así, los parámetros climatológicos que inciden sobre la tasa de evaporación son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. No obstante, cuando la superficie evaporante es la superficie del suelo, la cobertura vegetal afecta el proceso de evaporación de la superficie del suelo (Allen *et al.*, 2006). En cambio, el proceso de transpiración en las plantas ocurre de la siguiente manera: Cuando planta está en crecimiento activo, existe una necesidad continua de agua, desde la epidermis de la raíz hasta las paredes celulares del parénquima de las hojas. El agua entra a la planta gracias a los gradientes de potencial hídrico, debido a que el aire en los espacios intercelulares de las hojas está prácticamente a presión de vapor de saturación, mientras que el aire exterior rara vez está saturado de agua, el vapor de agua se mueve desde el interior de la hoja hacia la atmósfera exterior mediante las aperturas estomáticas (Sánchez-Díaz y Agurreolea, 2013). Además, la densidad de los estomas y su fisiología depende de la especie y del tipo de fotosíntesis que lleve a cabo. Así, las especies tropicales no tienen que hacer esfuerzo por evitar la evapotranspiración, mientras que las especies xerofitas desarrollan muchas estrategias para evitarla

Entonces, la mayor parte del agua que es absorbida del suelo se pierde por transpiración y una pequeña parte se convierte en parte de los tejidos vegetales (Allen *et al.*, 2006). La tasa de transpiración es determinada por el aporte de energía, el gradiente de presión de vapor, la velocidad del viento, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica, el contenido de agua en el suelo, la capacidad del suelo de conducir agua a las raíces, el tipo de cobertura vegetal, pues cada tipo de vegetación tiene su propia tasa de transpiración

(Allen *et al.*, 2006).

La evapotranspiración se manifiesta cuando la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente. En el caso de la evaporación del suelo con cobertura vegetal, ésta no sólo depende de la cantidad de agua en el suelo, sino también de la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo, pues esta fracción disminuye a medida que el dosel proyecta más sombra (Allen *et al.*, 2006). En los suelos descubiertos o con vegetación con poco dosel la evaporación suele ser directamente del suelo, pero cuando el dosel es amplio y cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. Así, la evapotranspiración total se rige por las proporciones que contribuye cada uno de estos procesos (Allen *et al.*, 2006). De esta manera, la pérdida de cobertura forestal, así como la pérdida del sotobosque y la ganancia de herbáceas o la pérdida total de vegetación, debido al cambio de cobertura terrestre, provocan alteraciones en el volumen de evapotranspiración, lo que afecta eventualmente al resto de los componentes del balance hídrico.

Por otro lado, es difícil saber cuál es la evapotranspiración en un solo punto de muestreo, ya que es un fenómeno del que dependen muchas variables climáticas y a su vez, la evapotranspiración se dispersa en el ambiente. Por eso, se idearon dos variedades de evapotranspiración: *la evapotranspiración real y la evapotranspiración potencial*. La evapotranspiración real es la verdadera cantidad aproximada de agua evaporada desde la superficie del suelo y que transpira a través de los estomas de las hojas de las plantas. El principal factor que determina la evapotranspiración real es la humedad del suelo, que es alimentada por la infiltración y puede servir como reserva de agua ó podría ser evaporada por el suelo y las plantas (García y Otero, 2005). Por otra parte, la evapotranspiración potencial es la pérdida de agua que ocurrirá si en ningún momento existiera una deficiencia de misma en el suelo para uso, siempre y cuando estuviera totalmente cubierto por vegetación verde. Los factores que afectan la evaporación potencial son los determinados por la superficie de evaporación y por las condiciones atmosféricas (García y Otero, 2005).

En cuanto a la estimación de la evapotranspiración, es útil mencionar que de acuerdo con Allen y otros (2006), durante los últimos 50 años se desarrollaron métodos empíricos por numerosos científicos y especialistas, con el fin de estimar la evapotranspiración a partir de diferentes variables climáticas. Algunos de estos son: Blaney Criddle, radiación, Penman modificado y el método de tanque de evaporación. En el método Penman modificado se consideró que ofrecía los mejores resultados con el mínimo error (Allen *et al.*, 2006). Además, el análisis de funcionamiento y la dispersión de resultados obtenidos por varios métodos de cálculo evidencio la importancia de crear un único método para calcular la evapotranspiración. De este modo, el método Penman Monteith tienen el mejor comportamiento y consistencia a nivel global, por lo que este método se recomienda como el método estándar para dicho cálculo, pues funciona en una amplia gama geográfica y climática y cuenta con previsiones para su uso en situaciones de falta de datos (Allen *et al.*, 2006). Básicamente, el modelo Penman Monteith incluye a los parámetros que gobiernan el

intercambio de energía y el flujo de calor (evapotranspiración de grandes extensiones uniformes de vegetación. La mayoría de los parámetros son medidos o pueden calcularse de datos meteorológicos. A este algoritmo, Mu y otros (2007) le añadieron el déficit de presión de vapor y restricciones de temperatura en la conductancia estomática, que de acuerdo con los estudios de estos autores, la modificación mejoró la estimación para la evapotranspiración real (Mu *et al.*, 2007).

Efectos del cambio de cobertura terrestre sobre la evapotranspiración

La cobertura terrestre ha sido alterada por las actividades humanas, de tal manera que la cobertura forestal ha tendido a disminuir, mientras que la agricultura y los pastizales se han extendido. Una consecuencia de dicho cambio, especialmente la deforestación, a escala global y regional, son las variaciones inciertas de la evapotranspiración (Yao *et al.*, 2014). En este sentido, Amatya y otros (2016) reportan una investigación en Estados Unidos sobre la respuesta de la evapotranspiración en diferentes regiones climáticas. Entre las conclusiones más relevantes mencionan que la temperatura no siempre tiene un papel significativo en la evapotranspiración, particularmente en una escala intra-anual. Además, mencionan que dependiendo de la región hidroclimática, temporada y escala de tiempo, dominan diferentes elementos sobre la evapotranspiración (Amatya *et al.*, 2016).

Por otro lado, Peel y otros (2010) realizaron un estudio que evaluó el impacto de la vegetación en el promedio de la evapotranspiración anual a escala global. Entre las conclusiones más relevantes que infirieron son que las diferencias significativas en la evapotranspiración anual entre regiones boscosas y no boscosas dan resultados consistentes. Estos resultados señalan que para los climas tropicales la evapotranspiración anual es aproximadamente 170 mm más alta en las regiones boscosas que en las no boscosas. En las regiones templadas, las regiones forestales exhiben una media más alta de 130 mm en la evapotranspiración anual que las regiones no forestales. Además, el tipo de vegetación influye en el volumen de evapotranspiración (Peel *et al.*, 2010).

En el estudio realizado por Yao y otros (2014) mencionan que los cambios en la cobertura forestal están generalmente correlacionados con la evapotranspiración terrestre anual, de tal modo que en a una escala de tan sólo 10 kilómetros hubo una correlación positiva entre la evapotranspiración y los cambios de cobertura. No obstante, la deforestación también reduce la cobertura fraccionaria de la vegetación, que en última instancia disminuye la transpiración de la vegetación. Sin embargo, a nivel regional la deforestación juega un papel menor en la regulación de la evapotranspiración. (Yao *et al.*, 2014).

En otra investigación posterior, Yang y otros (2015) mencionan que para el rendimiento de agua, la evapotranspiración es el factor de mayor influencia, de tal forma que a mayor evapotranspiración, menor provisión de agua habrá. Además, encontraron que hubo diferencias en la evapotranspiración entre los bosques de crecimiento primario y de crecimiento secundario y que los bosques artificiales han demostrado tener un mayor

consumo de agua que los bosques naturales. Asimismo mencionan que los efectos de la evapotranspiración por los cambios de cobertura terrestre, por lo general implican menos agua disponible para uso humano (Yang *et al.*, 2015).

De manera concreta, ante los cambios de cobertura terrestre, se modifican procesos importantes, como el de la evapotranspiración en el ciclo hidrológico, ya que por un lado al quitar la cubierta natural primaria, se deja el suelo desprovisto de dosel, lo que provoca que aumente la evaporación del suelo y el ecosistema sea más vulnerable a la sequía y a la erosión. Además, al cambiar la cubierta vegetal y colocar otras, no se asegura que los volúmenes de evapotranspiración estén en equilibrio con el resto de los elementos del balance hídrico, lo que pone en riesgo la disponibilidad de agua para la biota y las personas. También es necesario enfatizar que el cambio de cobertura promueve la compactación del suelo, lo que provoca que menos cantidad de agua almacenada en el suelo esté disponible para las raíces de las plantas.

Efectos del cambio de cobertura terrestre en el almacenaje de carbono

Cambio de cobertura terrestre y captura de carbono son procesos ligados entre sí, por ello son también elementos esenciales en el contexto de cambio climático actual generado fundamentalmente por la emisión masiva de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera. Para abordar este tema se explicará la parte terrestre del ciclo del carbono. El carbono es un elemento fundamental para los compuestos orgánicos. La disponibilidad del carbono no es infinita, por lo que circula entre la materia orgánica y el ambiente físicoquímico de manera continua. El ciclo ocurre a diferentes escalas espacio-temporales, que van desde el nivel molecular hasta el global. Cuando el carbono se une con el oxígeno en su unión molecular, se convierte en bióxido de carbono (CO_2), gas resultante de procesos tanto geoquímicos como biológicos. La presencia del dióxido de carbono junto con el vapor de agua en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura global (Jaramillo, 2004). Las plantas superiores adquieren CO_2 atmosférico por difusión a través de pequeñísimos poros de las hojas conocidas como estomas y es transportado hacia los cloroplastos para que se lleve a cabo la fotosíntesis. Una fracción de CO_2 regresa a la atmósfera, pero la cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta. La mitad de la producción primaria se integra en los tejidos de las plantas, como hojas, raíces y tejido leñoso. La mitad restante regresa a la atmósfera en forma de bióxido de carbono atmosférico como resultado de la respiración de las plantas (Jaramillo, 2004). Eventualmente, con el paso del tiempo todo el carbono almacenado regresa a la atmósfera por dos vías: la respiración de organismos heterótrofos o por combustión. Cuando la biomasa muerta se integra al suelo, esta se integra al detritus o al humus, entonces todo el carbono depositado en la biomasa antes viva, ahora almacena el carbono en el suelo, donde eventualmente es liberado y regresa a la atmósfera (Jaramillo, 2004). De manera concreta, en la cubierta terrestre el flujo de carbono se transfiere hacia las plantas mediante la fotosíntesis, mientras que el bióxido de carbono regresa hacia la atmósfera gracias a la descomposición de la materia orgánica.

Algunas estimaciones muestran que la vegetación terrestre a través de sus procesos fisiológicos tales como la fotosíntesis, absorbe 110 GtCaño^{-1} . Los océanos absorben aproximadamente 93 GtC año^{-1} y además se estima que conservan $38\,500 \text{ GtC}$. Pese a que los sumideros de carbono eliminan de la atmósfera tanto carbono como el que aportan de forma natural, la deforestación y la quema de combustibles fósiles están provocando un aumento de 3 GtC año^{-1} en la atmósfera (Maser y otros, 2000), por lo es fácil afirmar que la cobertura terrestre tiene una gran relevancia en la captura de carbono.

Con los cambios en la cobertura terrestre, todos los elementos del cambio climático entran en juego. Los cambios en la superficie de la Tierra pueden resultar en la emisión o la eliminación de bióxido de carbono en la atmósfera y así los cambios en el balance de la radiación de la Tierra. Los cambios en la cobertura terrestre también pueden cambiar el balance de radiación alterando el albedo de la superficie del planeta. Además los cambios en la superficie del suelo pueden alterar los flujos de calor sensible y latente a la atmósfera y, por lo tanto, la distribución de energía dentro del sistema climático. Esto puede alterar el clima a nivel local, regional e incluso global. Las estrategias de mitigación que se basan en algún beneficio fiscal para cambiar el flujo de dióxido de carbono a la atmósfera no reconocen simultáneamente la importancia de los cambios en el albedo o en el flujo de energía dentro del sistema terrestre, lo que puede llevar a los tomadores de decisiones a tomar elecciones que no produzcan los resultados previstos (Marland, *et al.*, 2003).

En el caso particular de los bosques, estos tienen el potencial para ser grandes sumideros de carbono. No obstante, los análisis de mitigación del cambio climático han planteado que el sector forestal es particularmente difícil debido a que existen grandes lagunas en cuanto a las necesidades de carbono en la vegetación y los suelos, particularmente en los ecosistemas tropicales (Maser, 1995). Los bosques son a la vez fuentes y sumideros de carbono, que tienen complejas dinámicas de tiempo que involucran el almacenamiento de carbono con tiempos de residencia contrastantes (Maser, 1995).

En este sentido, los organismos fotosintéticos, ya sean plantas o algas se caracterizan por fijar el carbono disperso en la atmósfera al llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, incorporando el carbono a sus procesos fisiológicos y a los tejidos para su crecimiento. De esta forma se crean sumideros de carbono que resultan del flujo de carbono de la atmósfera hacia el sistema. Otra vía alternativa es el almacenamiento de carbono en el suelo, y ocurre cuando materia en descomposición, hojarasca u otro tipo de biomasa se deposita en el suelo, entre rocas sedimentarias o en el fondo del mar. Ahora bien, de acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) se distinguen 5 acervos para el almacenamiento de carbón en los bosques: biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, mantillo y hojarasca (Pardos, 2010).

En ese mismo orden de ideas, la mitigación de la emisión de dióxido de carbono debe entenderse como una acción que resulta en un aumento neto en la densidad de carbono en un territorio determinado y/o la sustitución de combustibles fósiles. A nivel biofísico,

existen dos opciones posibles de mitigación: 1) Evitar las emisiones de carbono y 2) aumentar la fijación y el almacenamiento de carbono.

Ante estas circunstancias, EAP (1995) propuso una metodología para desarrollar un análisis integral de las opciones de mitigación forestal y que puede incluir las siguientes etapas: 1) selección de las opciones de mitigación, 2) evaluación de la superficie terrestre actual y futura para la implementación de las diferentes opciones, 3) estimación de la unidad de emisión y retención de carbono para cada opción, 4) estimación de los costos y beneficios, 5) desarrollo de los escenarios futuros, 6) evaluación de rentabilidad y 7) análisis de las políticas públicas (Masera, 1995).

Sin embargo, el primer paso es saber cómo se va a estimar el carbono dentro de un ecosistema terrestre y el horizonte de planificación (en años). Así, las reservas de carbono incluyen el carbono almacenado en la vegetación aérea y subterránea, y en la descomposición de materia, suelos y productos de madera, así como el carbono ahorrado por la quema de madera para energía en el lugar de los combustibles fósiles. El promedio del carbono almacenado es necesario porque sufre de variaciones en el tiempo (Masera, 1995).

No obstante, para incorporar cualquier estrategia de mitigación de carbono se debe estimar el secuestro neto de carbono asociado con la opción propuesta. Esto requiere definir una referencia y el horizonte temporal. El caso de referencia es la cantidad de carbono que puede ser secuestrado si no se lleva a cabo ninguna medida de mitigación. Así, el beneficio de la estrategia propuesta es la diferencia entre el carbono total secuestrado con y sin propuesta (Masera, 1995).

Relación entre cambio climático y cambio de cobertura forestal

IPCC (2001) considera cambio climático como una “importante variación estadística en el estado medio del clima o en su *variabilidad*, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras. Por su parte, la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, en su artículo 1, define cambio climático como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. La CMCC distingue entre cambio climático atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuida a causas naturales”. Asimismo, el clima terrestre debe entenderse como “el producto de la constante y compleja interacción entre la atmósfera, los océanos, las capas de hielo y nieve, los continentes y muy importante, la vida en el planeta (plantas y animales en los bosques y selvas, en océanos y en la atmósfera)” (Conde, 2006).

En la atmósfera existen gases de origen natural y origen antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido a su vez por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Además existe en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero totalmente producidos por el hombre, como los halocarburos y otras sustancias que contienen cloros y bromuro, de las que se ocupa el Protocolo de Montreal. Además del CO₂, N₂O, y CH₄, el Protocolo de Kyoto aborda otros gases de efecto invernadero, como el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) (IPCC, 2001).

Como ya se mencionó previamente, la presente investigación se ocupa particularmente del almacenaje de carbono en la cobertura forestal como un medio de mitigación de las altas concentraciones de CO₂ en la atmósfera. Este gas surge principalmente como un subproducto de la combustión de combustibles fósiles, además de cambios en el uso de las tierras y otros procesos industriales. Se trata del principal gas de efecto invernadero antropogénico que afecta al equilibrio de radiación del planeta (IPCC, 2001). En este sentido, el Banco Mundial (2016) reporta que la emisión de CO₂ a escala mundial y en 1960 era de 3.1 toneladas métricas per cápita y ascendió a 5 toneladas métricas per cápita para el 2013. Sin embargo, es importante destacar que los países con mayores ingresos emitieron en 2013, 13 toneladas métricas per cápita de CO₂, mientras que los países con ingresos medianos y bajos para el mismo año emitieron en promedio 1.4 toneladas métricas per cápita de CO₂. En el caso particular de México, para el año 2013 emitió 3.9 toneladas métricas per cápita de CO₂ (Banco Mundial, 2016). Esto es un indicador de que los países desarrollados emiten más CO₂, que los países en vías de desarrollo, debido a su nivel de consumo.

Por otro lado, Masera y Ordoñez (2001) realizaron un estudio en el que estimaron el potencial de captura de carbono en México entre 1990 y el 2030 usando dos escenarios distintos, uno de referencia (con la tasa real de deforestación en el 2000) y otro de mitigación. Entre sus resultados más importantes mencionaron que la diferencia entre estos dos escenarios fue de 37×10^6 ton C en el año 2000 e incremento a 1382×10^6 ton C en 2030. Es importante resaltar que el significado de estos resultados es que si bien nuestro país tiene un alto potencial en la captura de carbono como una estrategia de mitigación ante la emisión de CO₂, en el país se estaba capturando en el año 2000 sólo el 2.6 % aproximadamente del total de su potencial (Ordoñez y Masera, 2001).

Integrando la información vertida en los párrafos anteriores, se puede deducir claramente que los bosques y las selvas son ecosistemas terrestres muy importantes en las estrategias de mitigación del cambio climático. No obstante, la quema de áreas forestales y la deforestación provocan la pérdida de CO₂ hacia la atmósfera. Es por esta razón que la conservación de los bosques, el buen y controlado manejo forestal y la reforestación efectiva adquieren relevancia en las estrategias para reducir los niveles de CO₂, gas que

contribuye con las condiciones para que se genere el cambio climático, ya que por cada hectárea de bosque se espera que se almacene en los bosques naturales de 98-134 tonC/ha (de Jong *et al.*, 2004).

Cuenca hidrográfica

Cuando se realiza una investigación en cierta extensión de terreno, es importante delimitar el área de estudio. Sin embargo, estas delimitaciones dependen de los objetivos del estudio en cuestión. En el caso particular de las cuencas hidrográficas, éstas representan un sistema funcional y complejo que incluye a todos los elementos que pueden incidir sobre los recursos hidrológicos o viceversa.

En este sentido, una cuenca hidrográfica debe entenderse como el área en la que transcurren y convergen los ríos, los cuáles se extienden a lo largo de toda la cuenca. Cuando la lluvia cae en una cuenca el agua fluye hacia el cauce principal ubicado en las partes de menor elevación. El agua se drena junto con sedimentos y materiales disueltos hacia un cuerpo receptor o salida. Éste término incluye aguas superficiales y subterráneas (Wagner-Lotkowska y Magnuszewski, 2004) (O'Keefe, *et al.*, 2017). Los límites de una cuenca hidrográfica son determinados considerando el relieve del paisaje. En muchas cuencas el área que abastece un río de aguas subterráneas no coincide con el cauce superficial. En tal caso, la cuenca hidrográfica debe ser delineada a partir de las líneas de contorno del agua subterránea (Wagner-Lotkowska y Magnuszewski, 2004).

Las cuencas hidrográficas vistas como un sistema, están compuestas por elementos biofísicos (agua, suelo), biológicos (flora, fauna) y antropogénicos (socioeconómicos, institucionales, culturales), que están relacionados entre sí, de tal manera que al modificarse algún elemento, otro se afecta también (Ramakrishna, 1997).

Para comprender la complejidad de las cuencas hidrográficas, es necesario saber que cada una de éstas se divide en tres zonas funcionales diferentes: Cuenca alta, cuenca media y cuenca baja. La cuenca alta pertenece a aquellas áreas aledañas a la divisoria de aguas, en la porción más elevada de la cuenca. Esta zona incluye sistemas montañosos y lomeríos, donde se inician y confluyen corrientes de primer y segundo orden. Además, el relieve se caracteriza por tener la mayor inclinación de las pendientes (Garrido *et al.*, 2010). La cuenca media es el área de transición entre la cuenca alta y la cuenca baja del sistema hidrográfico. En esta zona se encuentran sistemas de lomeríos, colinas, valles y planicies entre las montañas y porciones de abanicos aluviales y rampas de piedemonte, con un relieve medio. En esta zona se integra en mayor volumen la red de drenaje con corrientes de segundo, tercer y cuarto orden (Garrido *et al.*, 2010). En la cuenca baja se ubica la zona del área de salida o emisión del sistema de drenaje, ya que la altimetría es la más baja de toda la cuenca. Esta zona incluye las áreas aledañas al cauce principal antes de su salida hacia el mar o algún cuerpo interno. La orografía tiende a la planicie, por lo que es frecuente que sean áreas de inundación ordinaria y extraordinaria (Garrido *et al.*, 2010).

De acuerdo con Ortiz (2010) las cuencas pueden describirse de diferente manera, ya sea por

la composición espacial o por sus características geomorfológicas. Toda la información contenida en este párrafo fue obtenida de esta misma referencia (Ortiz, 2010) En el primer caso se encuentran las cuencas alóctonas y autóctonas. Las cuencas alóctonas tienen una composición espacial que se caracteriza por tener nacientes distantes, por lo que las corrientes transcurren entre varias regiones naturales, con distintos climas. Esto implica que también existen diversas condiciones geológicas, y por tanto, diversos relieves. Por su parte, la cuenca autóctona se distingue por tener un paisaje homogéneo. En este sentido, la cuenca alóctona tiene ventaja sobre la cuenca autóctona porque recibe un gasto constante de agua, lo que equivale a un flujo de alto rango, asegurando así la conectividad para captar, almacenar, concentrar, asimilar, transformar y transferir materia y energía. Además, en la cuenca alóctona las trayectorias de la corriente mantienen rumbos multidireccionales, lo que mantiene un fuerte control estructural. En cambio, las cuencas autóctonas por lo general son pequeñas, por lo que suelen pertenecer a una sola región. Con respecto a la caracterización geomorfológica, la orientación de la red hidrográfica de los colectores depende de la posición del eje orográfico y los frentes montañosos de la vertiente. Así, pueden encontrarse estos tipos de organización espacial con base en la geomorfología: 1) El primer patrón es una cadena montañosa con planicie costera marginal, en ella la corriente desemboca en la llanura de forma perpendicular a la cadena montañosa; 2) El segundo caso es una vertiente marginal paralela a una cadena montañosa. La captación de agua ocurre en la parte media y superior de las laderas; 3) El tercer caso ocurre cuando se sobreponen vertientes, pues las cadenas montañosas se cruzan y conectan cuencas entre montañas escalonadas. Cuando la vertiente desciende y recorre la llanura costera, existe un intercambio de materia. Proporcionando riqueza y diversidad de ambientes.

Las cuencas hidrográficas son unidades funcionales con límites definidos y salidas puntuales, cuya estructura puede ser jerarquizada. Es decir, las cuencas pueden subdividirse en cuencas medianas, y a su vez, éstas pueden dividirse en cuencas pequeñas. Cada una de estas escalas anidadas se delimita de acuerdo con los objetivos del problema a resolver y los alcances del manejo y la gestión (Cotler *et al.*, 2013). En las cuencas pequeñas, que van desde unos cuantos kilómetros hasta un kilómetro cuadrado, el comportamiento de las cuencas se asemeja al de las colinas. Es decir, su comportamiento es altamente influenciado por las características del suelo. Así, si los suelos tienen alta capacidad de infiltración, se produce el escurrimiento. Pero si por el contrario, el suelo tiene una baja capacidad de infiltración debido al cambio de uso de suelo, se produce una alta tasa de escorrentía y se acelera la erosión del suelo, lo que envía los sedimentos corriente abajo (NAS, 1999). Por otro lado, las cuencas de tamaño intermedio, que van desde unos pocos kilómetros cuadrados hasta miles de kilómetros cuadrados, abarcan sistemas de terrenos más complejos y en estas se dan una mayor variedad de procesos, ya que a diferencia de las cuencas más pequeñas tienen mayor espacio para el almacenamiento temporal de agua, sedimentos y productos químicos asociados. Las cuencas intermedias tienen pendientes más complejas y mayor espacio para almacenamiento de agua y sedimentos. Los ríos suelen experimentar cambios debido al volumen de la escorrentía (NAS, 1999). Las cuencas grandes son áreas mayores a 10000 kilómetros cuadrados. En estas cuencas se

incluyen extensas áreas de deposición de sedimentos y químicos emitidos aguas arriba. Los ríos incluyen valles parcialmente llenos de aluviones o áreas deltaicas que se extienden hasta el mar. En las cuencas grandes abarcan múltiples provincias geológicas y de vegetación, e incluyen la más amplia variedad de tipos de uso de suelo (NAS, 1999).

De esta manera, al pensar en las cuencas hidrográficas como unidades espaciales funcionales que son altamente complejas, es necesario integrar los elementos presentes en ellas para entender las dinámicas que afectan el funcionamiento de las mismas. Dicha integración puede ser descubierta desde varios enfoques, pero en este caso particular nos basaremos en los elementos biofísicos, biológicos y antropocéntricos. En primer lugar nos enfocaremos en la parte biofísica. En el caso particular del suelo, este es un elemento esencial de la cubierta terrestre de nuestro planeta y es fundamental en el establecimiento de los ecosistemas terrestres, aunado al hecho incuestionable de que el desarrollo social y económico está íntimamente relacionado con el estado del suelo. En este sentido, la FAO define al suelo como “un cuerpo natural que consiste en capas compuestas de materiales minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo combinado con el clima, la topografía, los organismos y los materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia y propiedades” (FAO, 2017).

El suelo desempeña un papel vital, ya que gracias a sus características fisicoquímicas es posible el cultivo de plantas que proveen de alimentos, fibras, papel, ropa y leña. Además, el suelo filtra contaminantes del agua y es medio de recarga del agua subterránea, tiene un papel importante en los ciclos biogeoquímicos y es hábitat para los microorganismos y biota (Schoonover y Crim, 2015). En conclusión, los suelos son el sustento de los ecosistemas terrestres.

Los factores que determinan la formación del suelo son: material parental, clima, biota, topografía y viento (Schoonover y Crim, 2015). El material parental le da las propiedades físicas y químicas que pueden afectar propiedades como drenaje, porosidad y agua disponible para las plantas. El clima influye directamente en la humedad y temperatura del suelo. Asimismo, la formación del suelo se influye por la temperatura y precipitación, ya que ambos factores facilitan la meteorización de las rocas y por ende, fomentan la formación de los suelos. El perfil del suelo está relacionado con actividades de la biota que afectan su porosidad. Entre estas están madrigueras, montículos, canales de raíces y transformación de materia. Los largos poros que se crean por intervención de la biota facilitan el rápido movimiento del agua, gases y solutos a través del suelo. Finalmente, la topografía tiene una fuerte influencia en las características del suelo, ya que la inclinación facilita la erosión y los sedimentos pueden depositarse en los valles (Schoonover y Crim, 2015).

Otros factores que inciden sobre las cuencas son el clima, la temperatura, el viento, la cantidad de radiación solar recibida, precipitación, etc. Sin embargo, todos estos elementos dependen de la dinámica global del planeta, lo que hace difícil encontrar una correlación entre cada uno de estos factores y el resto de los elementos a nivel de cuenca. Por otra

parte, los elementos bióticos que inciden sobre la cuenca son representados por las especies que cohabitan en el espacio, ya sean animales, plantas, hongos, virus o bacterias. La presencia de la biota es importante porque está implicada en los procesos básicos para el funcionamiento de la biosfera en su conjunto (Dorado, 2010). La relevancia de la biota en términos del flujo de materia y energía presente en los ecosistemas radica en su rol durante los procesos naturales, ya que suelen estar fuertemente ligados con los procesos de los elementos abióticos del ecosistema en cuestión (Begon *et al.*, 2006). Así, en los ecosistemas la fuente y sumidero de materia y energía se obtiene a partir de la producción primaria, la contribución de los descomponedores y detritívoros al procesar la materia orgánica muerta y la interacción entre herbívoros, carnívoros y parásitos, los cuales al interactuar proveen de las condiciones necesarias para continuar con el flujo antes mencionado.

Cuencas y servicios ambientales

La capacidad del suelo para almacenar agua está relacionada con su textura, estructura, cantidad de materia orgánica y el arreglo de los poros del suelo. Los suelos que tienen más materia orgánica tienen mayor cantidad de microporos, la cual permite retener más agua. La compactación de los suelos impacta la capacidad de retención, pues se debilita la estructura del suelo y colapsa los poros (Schoonover y Crim, 2015). Esto afecta a la cantidad de agua superficial y subterránea, y por tanto, el agua disponible para el resto de los elementos de la cuenca.

Asimismo, el agua es un importante elemento dentro de las cuencas hidrográficas ya que por definición las cuencas son áreas de tierra que está interconectada por una fuente de agua común que se drena a través de un ecosistema terrestre y puede o no terminar en las costas. De esta manera, las cuencas hidrográficas saludables tienen la capacidad de moderar los flujos de agua y purificar el suministro de agua potable, lo que es uno de los servicios más tangibles y valiosos de las cuencas (Postel y Thompson, 2005). No obstante, el cambio de uso de suelo provoca que las cuencas pierdan esta capacidad, lo que vulnera la disponibilidad y calidad de recursos hídricos para el resto de los elementos presentes en la cuenca.

El agua superficial se encuentra en las corrientes, lagos, humedales y océanos. Además, puede encontrarse como: agua líquida, nieve o hielo. Bajo la tierra se puede hallar el agua subterránea. Esta incluye al agua contenida en el suelo (Winter *et al.*, 1998). Los servicios hidrológicos que las cuencas ofrecen se pueden encasillar en cuatro categorías generales: 1) filtración/purificación de agua, 2) la regulación del flujo estacional, 3) control de erosión y sedimentos y 4) preservación del hábitat (Postel y Thompson, 2005). Las cuencas hidrológicas con una alta proporción de cobertura forestal y humedales son efectivas para moderar la escorrentía y los suministros de agua purificada, además pueden filtrar los contaminantes y atrapar los sedimentos que podrían llegar a ríos y lagos (Postel y Thompson, 2005). En cambio, en las cuencas con una reducida cubierta forestal se disminuye la habilidad de asimilar y procesar los contaminantes, y por tanto, se degrada la

calidad del agua (Postel & Thompson, 2005).

El valor que el hombre asigna a la biota en los ecosistemas en los que están inmersos dentro de las cuencas hidrográficas suele ser determinado a partir de los servicios ecosistémicos que proporciona. De tal forma que, según la clasificación de la evaluación del milenio, la biota contribuye con los servicios de provisión de alimentos, materias primas y recursos medicinales. En los servicios de regulación la biota contribuye con la regulación del clima local, secuestro y almacenamiento de carbono, la moderación de eventos extremos, el mantenimiento de la fertilidad del suelo, polinización, y control biológico. En los servicios de soporte la biota colabora con el mantenimiento de la diversidad genética al facilitar la reproducción de las especies y con el establecimiento de hábitats (Millenium Ecosystem Assesment, 2005).

Hasta este punto es claro que cada elemento biótico y abiótico es indispensable para el establecimiento de los ecosistemas que se encuentran dentro de las cuencas y que la interacción entre estos elementos hace posible que se lleven a cabo los procesos naturales necesarios para el buen funcionamiento de las cuencas hidrográficas. No obstante, los factores antropogénicos inciden sobre los recursos naturales, y a su vez, la disponibilidad y calidad de los recursos repercute sobre el desarrollo de las sociedades. En este sentido, los factores antropogénicos deben ser entendidos como aquellos efectos o procesos que son derivados de las actividades humanas. Ejemplos de esto son: la actual crisis de agua debido a la sobreexplotación de los recursos hídricos, el cambio climático como resultado de la emisión de gases de efecto invernadero y la crisis alimentaria a la que nos enfrentamos a nivel mundial por el deterioro del suelo y la ineficiente distribución de los alimentos. De acuerdo con Carabias (1988) este deterioro ambiental se potenció con la revolución industrial, el incremento de la densidad poblacional y el asentamiento del capitalismo como modelo económico a nivel global, ya que estos fenómenos se basan en el cambio de uso de suelo, la extracción constante de recursos naturales y materias primas, así como la emisión de contaminantes. Sin embargo, se sugiere también que para disminuir los daños ambientales, se debe buscar un modelo sustentable de desarrollo que satisfaga las necesidades de la población, en lugar de perseguir el lucro per se (Carabias, 1988). Esto significa que para menguar la crisis ambiental que vivimos no basta con hacer esfuerzos aislados que eviten o disminuyan el efecto de alguno de los factores causantes del deterioro ambiental, sino que es necesario articular esfuerzos de todos los actores sociales económicos y políticos que estén involucrados en alguno de los problemas ambientales.

Cuenca Usumacinta

Una de las cuencas más importantes a nivel nacional, por su extensión, su riqueza biológica y su aportación hidrológica es la cuenca Usumacinta. Además, esta cuenca junto con la del Grijalva poseen entre ambas el 66% de la diversidad biológica del territorio nacional y alberga un gran mosaico de ecosistemas, tales como bosques, selvas, pantanos, manglares, etc. (March & Castro, 2010). El presente trabajo se enfoca en la cuenca Usumacinta, que es

transfronteriza y comprende territorio de México, Guatemala y Belice.

Se trata de una cuenca alóctona distante, según el mapa de clasificación ecogeográfica de las cuencas hidrográficas de México (Cotler, 2010). Esto quiere decir que en la cuenca tiene nacientes distantes. En ella se encuentran varias regiones naturales, gran diversidad de relieves y recibe un gasto constante agua, por lo tanto, tiene gran conectividad dentro de la cuenca.

La cuenca tiene de forma general tres tipos de climas diferentes: 1) Cálido-Húmedo con lluvia todo el año, 2) Templado-húmedo y 3) una pequeña porción de clima seco. Los climas templados se ubican en la Sierra Madre y el Macizo Montañoso de los Altos, el resto del estado de Chiapas tiene climas cálidos. En la depresión Central de Chiapas es notorio el clima seco durante la época de sequía (CONAGUA, 2014) (CONANP, 2015).

Esta cuenca está conformada por dos valles intermontanos que recorren la región de noroeste-sureste, entre cordones montañosos remanentes de la porción norte de la Sierra de Chiapas y Guatemala (CONANP, 2015). El origen de la cuenca Usumacinta se ubica entre las montañas de la Chamá y los Cuchumatanes (Amezcuca, et al., 2007). Al norte se encuentran las montañas plegadas del norte de Chiapas. Su altitud varía de 1500 hasta 50 m.s.n.m. Esta zona recibe precipitaciones mayores a 4000 mm anuales. Al oriente se encuentran las Serranías de Lacandona. La altitud mayor es de 1200 m.s.n.m., pero las altitudes que predominan son de 300 y 700 m.s.n.m., disminuyendo la pendiente hacia el río Usumacinta. El clima de esta región es cálido húmedo tropical, lluvioso la mayor parte del año (CONAGUA, 2014).

La red hidrológica en la cuenca Usumacinta es un sistema muy complejo. El río Usumacinta, es el río más caudaloso de Guatemala y México, mide aproximadamente 1200 kilómetros (CONAGUA, 2014). Este río se origina en la parte nororiental de la Sierra de los Cuchumatanes donde nacen el Río Chixoy o Salinas que conforma el curso superior del Usumacinta, La Pasión y el Lacantún (CONANP, 2015). El Área Natural Protegida “Cañón del Usumacinta” se ubica en la cuenca media del Usumacinta, e inicia debajo de la unión de los ríos Salinas, Lacantún y la Pasión, en lo que se conoce como el raudal Anaité. Debajo de dicho raudal se encuentra el raudal Desempeño, y seguido de este, río abajo se encuentra el raudal Porvenir que recibe el aporte del río Butziljá, y antes de cruzar la línea limítrofe entre Guatemala y México recibe el aporte del río Chicoljáh (CONANP, 2015). En México, juntos en la colindancia entre Chiapas y Tabasco el cauce del río encuentra tres raudales más: El raudal de la Pared o Baluarte, el raudal de San José el grande y el raudal de San Josecito. A lo largo del ANP, Cañón del Usumacinta, se integran 24 escurrimientos perennes y más de 482 kilómetros de escurrimientos intermitentes (CONANP, 2015).

En cuanto a la riqueza biológica, la cuenca Usumacinta es una de las zonas más importantes. En el área natural protegida “Cañón del Usumacinta” existen diversos tipos de vegetación como: selva alta perennifolia, selva baja espinosa subperennifolia inundable,

vegetación secundaria de selva alta perennifolia y de selva baja espinosa subperennifolia y tular (CONANP, 2015). En Chiapas también pueden hallarse bosques mesófilos de montaña y bosques de encino (Rodríguez, 2001).

En territorio mexicano, se constata la existencia de comunidades vegetales muy importantes como la selva alta perennifolia, que se distribuye hacia la serranía del Cañón del Usumacinta. En el municipio de Tenosique, la selva conforma un corredor en dirección sureste-noreste, hasta su confluencia con el río Usumacinta y hacia el sur con la frontera con Guatemala, formando las provincias bióticas más importantes. (CONANP, 2015). La selva alta perennifolia está constituida por diferentes estratos con dominancia de ciertos árboles, algunos de ellos pueden alcanzar hasta 45 metros de altura de fuste recto y copas amplias (CONANP, 2015). La vegetación secundaria de las selvas altas perennifolias está constituida principalmente por acahuales. Estas comunidades son de suma importancia para la fauna, como el venado cola blanca y el temazate, ya que son sitios de alimentación. También existe selva baja espinosa subperennifolia inundable con vegetación secundaria y tular. Estos tipos de vegetación se encuentran asociados en las primeras llanuras de inundación del río Usumacinta hacia su salida al Golfo de México. Con respecto a los pastizales, estos se ocupan como agostaderos y cubren un gran porcentaje de la ANP “Cañón del Usumacinta”. (CONANP, 2015). Así, la diversidad biológica en la cuenca Usumacinta es tan abundante que tan sólo en la región de Tenosique se reporta la existencia de 600 especies de flora, mientras que en el Cañón del Usumacinta se registran 422 taxa, donde al menos 7 especies vegetales se encuentran en la NOM-059. (CONANP, 2015).

Con respecto a la fauna, el Cañón del Usumacinta proporciona sitios de alimentación, descanso, refugio y reproducción para especies migratorias. Dentro del Cañón del Usumacinta se estima que existen 419 especies de vertebrados, 211 especies de aves, 130 especies de mamíferos, 29 especies de peces, 30 especies de reptiles y 19 especies de anfibios. Algunas especies provienen de Centroamérica, pero se introducen en la zona a través del río Usumacinta. En el área del Cañón del Usumacinta se reportan 115 taxa de fauna dentro de NOM-059, es decir, se encuentran en la categoría de riesgo (CONANP, 2015).

Servicios ecosistémicos en la Cuenca Usumacinta

En cuanto a los servicios ecosistémicos del Cañón del Usumacinta se destaca sus servicios como refugio y zona de transición entre la biodiversidad de los Altos de Chiapas y Guatemala y la planicie costera del Golfo de México, conformando un “corredor biológico” estratégico a través del Río Usumacinta, que escurre su materia orgánica a la planicie de Tabasco, que es transformada en nutrientes disponibles a la biodiversidad de los Pantanos de Centla, Laguna de Términos y una buena parte del Golfo de México (CONANP, 2015)..

Las selvas y bosques de la cuenca Usumacinta son importantes porque se encargan de regular los regímenes de agua mediante la intercepción de la precipitación y la regulación de su flujo a través del sistema hidrológico. También promueven el mantenimiento de la

calidad del suelo y la disposición de materiales orgánicos. Esto ocurre porque en términos generales reciben pocos aportes de nutrientes del exterior, y deben producir por sí mismos los nutrientes que necesitan, lo que logran mediante la formación de humus, La caída de hojarasca y la producción de raíces se encargan de proteger al suelo del impacto de la erosión hídrica que podría ocurrir debido a la alta tasa de precipitación. Los bosques logran modular el clima gracias a la regulación del régimen hidrológico. Además, contribuyen con mejorar la calidad del aire y regular el clima mediante la acción de la fotosíntesis, ya que los bosques y selvas son capaces de almacenar en sus tejidos el dióxido de carbono que emitimos, y que provoca el cambio climático. Asimismo, son componentes clave de la biodiversidad, tanto para sí mismos, y como hábitat para otras especies (Lindberg, et al., 1997). La importancia de la biodiversidad reside en que es la base de los servicios y bienes que proporcionan los ecosistemas, que además de los ya mencionados, se encuentra la provisión de alimentos, fibras, controlan plagas y vectores de enfermedades y protegen contra desastres naturales (Dorado, 2010)(CONANP, 2015).

Otro tipo de servicios que proveen los bosques y selvas son de índole económico. Los bosques forman la base de una variedad de industrias, incluyendo la madera, madera procesada y papel, caucho y frutas. Sin embargo, también contienen productos que son necesarios para la viabilidad de las comunidades rurales, como: combustibles, materiales de construcción, forraje, medicinas y hierbas. Además, es común el pastoreo y las parcelas temporales dentro de estos ecosistemas (Lindberg *et al.*, 1997)..

En el ámbito sociocultural, los bosques son el hogar de muchas personas, entre los que se encuentran culturas indígenas. Esto hace que existan fuertes lazos culturales y espirituales entre las personas y los bosques, ya que la cosmovisión de las etnias indígenas radica en que consideran a los bosques y al entorno natural como espacios sociales, con los cuales mantienen relación integral, es decir, material, social y espiritual, de dependencia recíproca (Schroeder y von Bremen, 2013).

En la cuenca Usumacinta también existen ecosistemas hídricos, como ríos, lagos y humedales. Este tipo de biomas proporcionan servicios como: el mantenimiento de ecosistemas y de pesca, brindan sitios de recreación y con valor escénico. Sin embargo, uno de los servicios ambientales más importante, tanto para la cuenca como para las regiones lejanas, es la provisión de agua dulce. El desarrollo social y económico depende de la disponibilidad de agua dulce.

Los pastizales también son ecosistemas importantes de la cuenca Usumacinta. Los servicios que estos biomas proporcionan son muy similares a los que proporcionan bosques y selvas, aunque la forma en la que se manifiestan es distinta. Los pastizales son una importante fuente de recursos alimenticios como: carne, leche o miel, ya que es la fuente de alimento del ganado que consumimos, cuyo rendimiento y calidad depende de la presencia de hierbas y leguminosas. Los pastizales afectan también la calidad del agua superficial y subterránea, pues la principal presión sobre éstas incluyen el uso de fertilizantes

nitrogenados y pesticidas en la agricultura. También son una fuente importante de plantas y otros recursos medicinales. Los pastizales seminaturales pueden moderar los fenómenos extremos como inundaciones o deslizamientos de tierra, reducen los escurrimientos extremos al mantener la recarga de aguas superficiales. Además, pueden reducir el escurrimiento de agua en un 20% en comparación con las tierras de cultivo y un 50% en comparación con las áreas urbanas. La riqueza biológica es importante porque lleva a cabo acciones importantes para la producción de los cultivos, puesto que: 1) los pastizales son hábitats para polinizadores como abejas o abejorros y 2) algunas especies llevan a cabo el control biológico de plagas, como los depredadores de artrópodos y parasitoides que suprimen las poblaciones de plagas herbívoras de los cultivos proporcionando servicios de biocontrol. A nivel cultural, los pastizales son sitios de avistamiento de aves, cacería, senderismo o disfrute de la belleza escénica (Honigová *et al*, 2012).

Problemática social en la cuenca Usumacinta

En el ámbito social, la cuenca Usumacinta ha tenido fenómenos de precariedad y desorganización. Tal es el caso del desplazamiento de la población campesina de Guatemala a la selva petenera, en la frontera con México. Este desplazamiento es debido a políticas de ordenamiento ambiental y además, se generó para contener dos fenómenos relevantes: 1) la guerrilla guatemalteca y 2) evitar la construcción de una hidroeléctrica, iniciativa del gobierno mexicano, que inundaría la selva petenera (Rodas, 2010). El abandono de campesinos y jornaleros en la selva los obligó a recurrir a la cacería como una fuente de abastecimiento. Sin embargo, la demanda de pieles provocó que los cazadores dejaran de pensar en cazar únicamente para satisfacer sus necesidades inmediatas y comenzaron a cazar para satisfacer la demanda del mercado. Al mismo tiempo, estos cazadores se convirtieron en jornaleros de temporal. De esta manera, la comunidad que arribó como campesinos desplazados se convirtieron en cazadores y luego en jornaleros, lo que transformó su cosmovisión con respecto al cuidado de la naturaleza y los hizo transformar su pensamiento con respecto a los recursos naturales y el medio ambiente como algo que podían explotar sin ningún control para obtener recursos económicos (Rodas, 2010). Además, con respecto al uso de suelo, existen dos fenómenos muy importantes: 1) La mayor parte del territorio del estado guatemalteco ha sido privatizado, lo que implica que existen dos tipos de pobladores, los que tienen una propiedad y los que migran constantemente de un territorio a otro, de tal manera que los poseedores de tierras dan trabajo temporal a los trabajadores flotantes y 2) los trabajadores flotantes o jornaleros de temporal suelen recurrir a la agricultura en tierras no otorgadas, lo que ocurre frecuentemente sobre las áreas protegidas. Además, sus prácticas siguen siendo tumba, roza y quema, lo que provoca la disminución de las áreas forestales y el avance de la frontera agrícola (Rodas, 2010). Por su parte, en el lado mexicano, se ha presentado un fenómeno diferente. En Chiapas la colonización de la frontera se fomentó como una estrategia para frenar la migración de centroamericanos hacia el norte. Esto provocó que aumentaran las comunidades rurales con poblaciones pequeñas, lo que implica que hay un mayor número de personas dispersas en el territorio chiapaneco. No obstante, las ciudades también han

tendido a aumentar su densidad. Este crecimiento demográfico, desde el punto de vista ecológico, ha provocado daños importantes, pues las poblaciones que habitan las ciudad demandan mayores recursos, lo que ha provocado una mayor explotación y degradación de los mismos, y a su vez, las poblaciones rurales, al dispersarse han tendido a cambiar el uso de suelo, aumentando la frontera agrícola (Rodríguez y Mohar, 2008).

De acuerdo con la investigación de Kauffer (2005), a pesar de que existe el consejo de las cuencas Grijalva-Usumacinta, de acuerdo al modelo de la Comisión Nacional del Agua (CNA) esta cuenca tiene problemas en la gestión de recursos por varias razones: 1) El gobierno está representado por cuatro de los siete vocales del consejo, lo que demuestra que los actores involucrados no gubernamentales están mal representados, pues con esta proporción el consejo tiende a aprobar las iniciativas gubernamentales sin hacer censos representativos; 2) Los vocales del consejo de Chiapas y Tabasco no trabajan en conjunto; 3) el único representante de los agricultores se encuentra en desventaja académica con respecto al resto, por lo que no tiene las herramientas necesarias para proponer alternativas o negociar las decisiones del consejo y sólo puede expresar las necesidades de su gremio, sin llegar a tener los alcances a los que podría aspirar y 4) El manejo de las cuencas no es efectivo, ya que la soluciones se siguen pensando en los términos de las entidades federativas (Kauffer, 2005).

Por otro lado, García y Kauffer (2009) en su análisis de las cuencas transfronterizas del sur de México afirman que las cuencas se rigen bajo divisiones políticas, truncando la posibilidad de analizarlas como el sistema complejo que son en realidad, puesto que la cuencas se conciben bajo un esquema social (García y Kauffer, 2011). En este sentido, la cuenca Usumacinta al pender del manejo de tres gobiernos diferentes, depende de la capacidad de negociación y acciones de los países involucrados, pues al interactuar entre diferentes construcciones sociales y políticas, así como diversos métodos y criterios, el manejo del territorio puede convertirse en un proceso muy complejo.

Problemática como cuenca transfronteriza

Hablando específicamente de la interacción entre México y Guatemala, los límites entre ambos países, en los que se involucra a la cuenca Usumacinta, se establecieron en 1882, especificando que los límites serían a perpetuidad (Sepulveda, 1958). Sin embargo, aún con los límites fronterizos, no se establecieron acuerdos del manejo del agua entre estos dos países (García y Kauffer, 2011). Por otro lado, las relaciones entre México y Belice son recientes, ya que Belice surgió como país independiente en 1981, aunque tampoco existen acuerdos de aguas compartidas entre ambos países (García y Kauffer, 2011).

No obstante, la relación binacional más importante es México-Guatemala, debido a que Guatemala posee el 58% de la cuenca Usumacinta (Cabrera y Cuc, 2002). Al respecto, García y Kauffer (2011) mencionaron que la cuenca Usumacinta presenta varios conflictos en el tema de las aguas compartidas, ya que 21 comunidades chiapanecas se abastecían de

fuentes de agua localizadas en territorio guatemalteco, y una comunidad guatemalteca que tomaba el agua de México. En el proceso de negociación, el gobierno guatemalteco propuso el pago por el agua que se toma de su territorio bajo el principio de cooperación y solidaridad. Las autoridades mexicanas por su parte no aceptaron pagar, argumentando que no había leyes que trataran los temas del agua en términos transfronterizos. Finalmente, ambos gobiernos acordaron aprovechar las fuentes ubicadas en su propio territorio (García & Kauffer, 2011). Tras muchos esfuerzos de cooperación, se estableció el plan marco de gestión integral de las cuencas hidrográficas compartidas para el desarrollo rural transfronterizo Guatemala-México en 2008, aunque en palabras de García y Kauffer (2011), no se llegaron a acuerdos con respecto al manejo de las cuencas hidrográficas compartidas. Ahora bien, puntualizando las conclusiones del trabajo de García y Kauffer (2011), las políticas transfronterizas planifican y ejecutan programas y proyectos a través de instituciones gubernamentales y de la sociedad civil con una visión político-administrativa sin tomar en cuenta la visión de cuenca en sus aspectos físico-natural y socio-espacial. No obstante, las autoridades mexicanas deberían estimular políticas transfronterizas que tengan una visión integral, ya que el territorio mexicano ocupa una posición de receptor por encontrarse en las partes medias y bajas de la cuenca (García & Kauffer, 2011), lo que coloca a nuestro país como territorio vulnerable ante los cambios ambientales de la cuenca alta de Usumacinta.

Con respecto a las acciones y los acuerdos de cooperación transfronterizos entre Guatemala y México que han logrado concretarse, Cabrera y Cuc (2002) mencionan que estos se dividen en tres sectores: el local, el institucional y el de las organizaciones no gubernamentales. En el sector local, las comunidades mayas y las adyacentes al río Usumacinta han establecido relaciones de cooperación y solidaridad ante los conflictos. En el sector institucional, en 1975 se creó la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), suscrito bajo el convenio de Tuxtla, con el objetivo de fomentar el desarrollo sostenido de los recursos limítrofes. Por otro lado, las relaciones de cooperación que se dieron entre las comisiones para auxiliar a los refugiados por parte de Guatemala y México respectivamente, repatriaron a 250 000 guatemaltecos entre 1980 y 1985, con auspicio del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados. Asimismo, se formó el Corredor Biológico Mesoamericano (CBM) con la intención de proteger la biodiversidad de la región centroamericana, abarcando siete países centroamericanos y cinco estados del Sur de México. Adicionalmente, en el sector de las organizaciones no gubernamentales, se han establecido diferentes iniciativas, entre ellas están: la alianza comunitaria de la selva maya, el proyecto guacamayas sin fronteras, el instituto de derecho ambiental y desarrollo sostenible, los defensores de la naturaleza y conservación internacional que trabaja en equipo en la frontera Ceibo en el monitoreo de los problemas ambientales ocasionados por los asentamientos humanos (Cabrera y Cuc, 2002).

En el ámbito social, uno de los factores más importantes que determinó la distribución de la población, en la década de los años setenta, fue un programa de colonización del sur de Petén y de la zona fronteriza con México, como medida de las autoridades de Guatemala

ante los problemas internos de tierras, y el interés de las autoridades del gobierno mexicano en desarrollar grandes proyectos de generación de energía utilizando los caudales del río Usumacinta (Cabrera y Cuc, 2002). Asimismo, en el caso particular de México, fue en 1940, con la ley de reforma agraria, cuando comenzó a delimitarse los términos de la colonización en territorio chiapaneco, ya que las tierras bajas del sur de Chiapas y parte del bosque tropical Lacandón fueron concedidas para la colonización, como respuesta a la demanda de tierra por parte de los campesinos (Cabrera y Cuc, 2002)

Crecimiento poblacional en la cuenca Usumacinta

Adicionalmente, la tasa de crecimiento poblacional en la cuenca Usumacinta ha crecido exponencialmente en las últimas décadas. En el caso de Guatemala la zona petenera en la década de los 90 al 2000 fue de 251%. En el año de 1998 la estimación de habitantes fue de 500 000 personas, mientras que para el 2001 la población aumentó a 850 000 habitantes, debido a la migración de la población (Cabrera y Cuc, 2002). En México no se han hecho reportes del crecimiento poblacional por cuenca, pero en el estado de Chiapas que ocupa la mayor parte del territorio de la cuenca Usumacinta en México, el INEGI (2016) reporta para 1980 una densidad poblacional de 2 084 717 habitantes, para 1990 estimó que habitaban en el estado 3 210 496 personas, en 2000 se calculó que la población fue de 3 920 892 personas y para 2010 la población del estado de Chiapas ascendió a 4 796 580 habitantes (INEGI, 2016). Además, dentro de la cuenca se ubican regiones de acelerado poblamiento, como Marqués de Comillas al sureste de la selva Lacandona y en la parte centro occidental del Petén (Cabrera y Cuc, 2002). Por otra parte, la población que habita la cuenca Usumacinta se reporta entre los índices más bajos de desarrollo humano tanto para México como para Guatemala, (Cabrera y Cuc, 2002).

Actividades económicas de la cuenca Usumacinta

En la cuenca Usumacinta, las actividades económicas son orientadas hacia el sector primario, excepto casos como la industrialización en las zonas de Tenosique y la zona central del departamento de Petén en Guatemala (Cabrera y Cuc, 2002). El desarrollo económico de la cuenca se ha llevado a cabo a través de actividades como agricultura, ganadería, actividades extractivas de productos maderables y no maderables como la pesquería, colecta de caracoles y camarón gigante, así como la caza de lagartos en los afluentes. En la agricultura se cultivan principalmente maíz, frijol, arroz, pepitoria, chile y otros. Sin embargo, el suelo de la cuenca no tiene vocación agrícola, por lo que la agricultura suele ser migratoria, lo que provoca la extensión de la frontera agrícola (Cabrera y Cuc, 2002).

ANTECEDENTES INMEDIATOS A ESTA INVESTIGACIÓN

Cambio de cobertura terrestre en la cuenca Usumacinta

En esta cuenca se han menguado la cantidad y calidad de los recursos forestales, debido al constante y masivo cambio de uso de suelo, socavando los servicios ecosistémicos de esta cuenca. Entre los procesos de transformación, la deforestación y la degradación de los ecosistemas en esta región continúan avanzando, sin detectar un cambio positivo en el nivel de vida de sus habitantes. Las investigaciones que se citan a continuación documentan lo anterior. Estos estudios no pueden concebirse si no se realizan desde la Geomática. Como ya se mencionó anteriormente, el desarrollo de esta ciencia y de su eje de integración los sistemas de información geográfica se detonó a partir de la necesidad de monitorear la cobertura terrestre, los recursos naturales disponibles y los fenómenos que se manifiestan sobre ella. Además, este escrutinio es necesario porque la cobertura terrestre es un sistema complejo y dinámico, que constantemente está sujeto a cambios que pueden ser resultado de fenómenos naturales o bien, pueden ser provocados por las actividades humanas.

El patrón actual de distribución de la vegetación primaria y secundaria, su grado de conectividad y el grado de transformación de las 10 cuencas más grandes de México considerando la superficie territorial que ha sido modificada por acción del hombre fueron estudiados por Cuevas y otros (2010). Bajo esta perspectiva nacional, la cuenca Grijalva-Usumacinta tiene 23.5% de vegetación primaria en relación al área total de la cuenca, 27% de vegetación secundaria en relación al área de la cuenca, el 30% de los bosques mesófilos de montaña, 3% de bosques templados primarios y secundarios, 18% de las selvas húmedas. Esta cuenca presenta una menor conectividad de la vegetación primaria, pues es de mayor tamaño y/o mayor desarrollo de actividades humanas. Además, es una de las cuencas con mayor índice medio de transformación (Cuevas y otros, 2010).

Respecto a los cambios de cobertura terrestre, Tapia-Silva, Mora y Núñez (2007) Caracterizaron a las cuencas del corredor biológico mesoamericano, entre las que se encuentra la cuenca Usumacinta. Entre las variables estimadas fue el cambio de cobertura terrestre, la cual clasificaron entre cobertura forestal y no forestal durante los años 1990 y 2000. Sus resultados muestran que en 1990 la cobertura forestal cubría el 63% de la cuenca, mientras que en el año 2000 cubría tan solo el 48%, lo que equivale a una tasa de deforestación del 2.26%. Estos resultados colocan a la cuenca Usumacinta como la segunda cuenca del corredor biológico mesoamericano de deforestación (Tapia-Silva, Mora & Núñez, 2007).

Por otro lado, Kolb y Galicia (2011), evaluaron los procesos de deforestación y regeneración en la cuenca Grijalva-Usumacinta desde 1993 hasta 2007 y obtuvieron todos los resultados incluidos en este párrafo. Para 1993 el 36% de la superficie de la cuenca Grijalva-Usumacinta estaba cubierta con vegetación primaria, el 24% con vegetación secundaria, 14% con áreas agrícolas y 26% con pastizales. Para 2002 estos tipos de cobertura se habían reducido a 28%, 16% y 29% respectivamente y para 2007 se observó

un patrón similar. En total se perdieron 9% de vegetación primaria y los pastizales ganaron 30% más en extensión (Kolb & Galicia, 2011). Así mismo, en los dos períodos todas las clases forestales perdieron área pero se encontró una fuerte diferencia entre los tipos de vegetación. La deforestación fue más alta en las selvas secas y los bosques de encinos y más bajas para el bosque mesófilo de montaña. De 1993 a 2007 la tasa de deforestación fue de 0.90%. Casi 74% del área deforestada (370 393 ha) corresponde al período de 1993-2002 con una tasa de 1.02% por año. En el 2002-2007 esta tasa bajó a 0.70% por año (133 001 ha), con el efecto más fuerte en las selvas tropicales y el menos fuerte para los bosques de encino. Además, este análisis reveló que entre 1993 y 2007 las clases con más pérdida en área fueron las selvas húmedas, bosques de coníferas (ambos >300 000 ha) y selvas secas secundarias (128 000 ha). Las selvas secas primarias constituyeron la clase con menos pérdida (4 000 ha). La cobertura secundaria se incrementó para casi todos los tipos de vegetación, con el aumento más grande para los bosques de coníferas (227 000 ha). Los pastizales fueron la clase que resultó con más aumento (392 000 ha), las áreas agrícolas aumentaron por 264 000 ha. Los dos períodos analizados mostraron tendencias generales similares con un decremento en magnitud para el segundo período. En 1993-2002, más área fue perdida en bosques de coníferas, selvas húmedas (>26 000 ha/a) y bosque mesófilo de montaña (11 500 ha/a). Las coberturas secundarias todas aumentaron su área, en el caso de bosques de coníferas más de 20 400 ha/a. Todas las clases de uso del suelo incrementan: la agricultura de temporal con 17 500 ha/a y los pastizales con 30 200 ha/a. Aunque el área total del incremento de las áreas urbanas fue poco (680 ha/a), esto representa un aumento de 20% respecto a la extensión en 1993 (Kolb y Galicia, 2011)

En 2002-2007 la mayoría de las pérdidas fueron entre las selvas húmedas y los bosques de coníferas (>11 200 ha/a), seguidos por el bosque mesófilo de montaña (2 500 ha/a). Las clases secundarias incrementaron otra vez pero con dos excepciones ahora: las selvas secas secundarias perdieron 4 700 ha/a y los bosques de encinos 50 ha/a. El aumento de las clases de uso comprendió desde las 320 ha/a para plantaciones forestales y 1500 ha/a para zonas urbanas hasta 17 600 ha/a para agricultura y 20 000 ha/a para pastizales (Kolb y Galicia, 2011).

Efectos del cambio de cobertura terrestre en la evapotranspiración

Con respecto a los efectos del cambio de cobertura terrestre en la evapotranspiración, se realizó un estudio en la región subártico de China, se evaluaron los efectos de la deforestación sobre los cambios en la evapotranspiración, utilizando el algoritmo de Penman. En los resultados más significativos, Yao y otros (2014) mencionan que la deforestación conduce en una escala local hacia el decremento en la evapotranspiración, porque la deforestación reduce la cantidad de radiación solar absorbida en la superficie, incrementando el albedo al reducir la cobertura vegetal, y por lo tanto, la superficie se calienta y la evapotranspiración se reduce debido a la convección de calor en las tierras boreales. De este modo, el albedo afecta a la evapotranspiración en una escala local.

Con respecto a la cuenca Usumacinta y sus circunstancias hídricas, Tapia y Núñez (2008)

evaluaron la cuenca en términos hidrológicos, realizando su estudio mediante datos obtenidos por PR. Entre los resultados más relevantes que obtuvieron que la cuenca Usumacinta se encuentra en un región donde se registran las tasas más elevadas de precipitación, alcanzando hasta 1700 mm/año. En dicha evaluación también mencionan que la escorrentía puede ser un indicador del nivel de conservación de una cuenca, en cuanto a cobertura vegetal y superficies impermeables. En este sentido, la cuenca Usumacinta produce los niveles más altos de escorrentía, en comparación con el resto del corredor biológico mesoamericano. Asimismo, el coeficiente de escorrentía-precipitación en el río Usumacinta es del 58% (Tapia y Núñez, 2008)..

Por otra parte, Tapia, Contreras y Rosales (2015) realizaron la caracterización hidrológica de la cuenca Usumacinta, entre 2008 y 2010. Los resultados de evapotranspiración que obtuvieron para el 83% de la cuenca no muestran grandes variaciones en el tiempo, como en el caso de la precipitación e infiltración, que si las presentan (Tapia, Contreras, & Rosales, 2015).

Efectos del cambio de cobertura terrestre en el almacenaje de carbono

No se hallaron estudios que estimen el secuestro de carbono en la cuenca Usumacinta. Sin embargo si se halló una estimación para el estado de Chiapas y la medición de carbono en uno de los ejidos de la cuenca.

En el primer caso, se trata de REDD+ Chiapas, en donde se menciona una lista de proyectos diseñados para mitigar los gases de efecto invernadero, especialmente el bióxido de carbono. Las premisas de las que parte este reporte son que en Chiapas, el cambio de uso de suelo contribuyó en el 2005 con el 57% de las emisiones totales de GEI (28 161 GgCO₂e), siendo la principal fuente de emisiones, seguido del sector agropecuario, con el 19%, lo que suma un total de 76% de emisiones para el sector rural (Paz, *et al.*, 2012).

Entre las observaciones que realiza Paz y otros (2012), mencionan que los programas planeados para la mitigación de los gases de efecto invernadero, no proporcionan los resultados necesarios para satisfacer las metas de REDD+, ni siguen la metodología sugerida por los protocolos del IPCC (Paz *et al.*, 2012). Esto sugiere que los programas que se han planeado para contrarrestar el cambio climático, disminuir la emisión y aumentar la captura de bióxido de carbono en el estado de Chiapas son insuficientes o están mal planteados.

Por otro lado, Montero y colaboradores (2008) realizaron una estimación de la cantidad de carbono capturado por un remanente se selva alta perennifolia en una superficie de 2500 m², en el ejido de Niños Héroes de Tenosique en Tabasco, México. El resultado obtenido fue de 61 137 toneladas de carbono en una superficie de 0.5 hectáreas.

Modelo geoespacial conceptual

Hablar de las cuencas hidrográficas bajo un enfoque holista no es tarea sencilla, dado que los elementos que inciden sobre el territorio son muy diversos y cambian según el contexto de espacio y tiempo. Por ello, Tapia (2016) propuso un método sencillo para generar modelos de conocimiento de los componentes de un sistema territorial y sus relaciones. El método permite diseñado para representar las relaciones observadas entre los fenómenos ambientales que son que se manifiestan en el territorio. y son causados, en su mayoría, son influenciados por las acciones humanas. Este método es denominado es el Modelado Geoespacial Conceptual (Tapia-Silva, 2016) y permite desarrollar proyectos en el ámbito de la Geomática a través de su disciplina integradora los GIS con la finalidad de generar información y conocimiento útiles para tomar decisiones espacialmente diferenciadas.

El marco del modelo geoespacial conceptual se basa en tres dimensiones: el espacio, el tiempo y el proceso de toma de decisiones. Las dos primeras se encargan de evaluar los procesos biofísicos y humanos que se manifiestan en el territorio y la tercera evalúa los procesos con los que se generan las políticas públicas y privadas (Tapia, 2016)

Tapia (2016) basa su modelo en un enfoque propuesto por Von Bertalanfy, del cual retoma algunos principios: establecer interconexiones entre los componentes de un sistema territorial identificados en forma holista, en el cual incluye factores ambientales, sociales, económicos, políticos, etc; definir agrupaciones de estos componentes para formar subsistemas; definir límites espaciales y temporales para el análisis, como monitoreo de cambios en el pasado con respecto a la situación actual, estudios en el presente o escenarios futuros; elección de los elementos que serán implementados en el ambiente de los SIG para generar la información requerido para diseñar y aplicar políticas públicas o privadas para la mejora del medio o problemática territorial en cuestión (Tapia, 2016).

La metodología que requiere el modelo geoespacial conceptual propuesto por Tapia (2016) es la siguiente:

Planteamiento del proyecto: Requiere un conocimiento exhaustivo del tema. Para ello se recomienda una revisión de literatura relacionada con la problemática de interés y de ser posible visitar a las zonas de estudio, así como entrevistas a expertos sobre la temática de interés.

Delimitación del sistema (definición de escala espacial y temporal): Establece la zona de estudio a partir del fenómeno a analizar y de su repercusión y funcionamiento en el área designada. La delimitación temporal depende de la escala temporal del estudio.

Identificación holista de componentes: Se indaga sobre todos los componentes del sistema que puedan formar parte de los posibles subsistemas en el entorno espacial y temporal elegido.

Identificación de ligas entre componentes y subsistemas: Se forman niveles de jerarquía tipo red entre los componentes del sistema para obtener como resultado el modelo de

conocimiento del sistema.

Selección de subsistemas y relaciones entre los elementos del proyecto a desarrollar en un entorno de SIG: Selección de componentes o subsistemas que se van a implementar de acuerdo a las capacidades y recursos disponibles en términos de tiempo, conocimiento y financiamiento.

Se espera que con la implementación del modelo geoespacial conceptual en SIG y el análisis y obtención de información y conocimiento útiles, se podrán tener las bases necesarias para desarrollar políticas públicas y privadas que generarán las condiciones para contribuir con un mejor manejo del territorio y ayudar con la problemática abordada (Tapia, 2016).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se presentará la metodología empleada para la construcción del modelo geoespacial conceptual, el cual permitió conocer y ordenar los factores sociales, ambientales y económicos que inciden sobre la cuenca Usumacinta. En seguida se expondrá la metodología utilizada para clasificar la cobertura terrestre y evaluar los cambios de la misma a través del tiempo. Posteriormente, se encontrará el procesamiento que se usó para estimar los cambios de evapotranspiración en la cuenca durante los años 2001 y 2009. Consecutivamente se mostrará el proceso para evaluar la relación que existe entre los cambios de cobertura terrestre y los cambios de evapotranspiración a nivel de cuenca y de áreas de captación. Finalmente, se expondrá la metodología utilizada para estimar los cambios en el potencial de almacenamiento de carbono en la cobertura forestal en la cuenca Usumacinta en función del área cubierta por cobertura forestal.

Modelo geoespacial conceptual

En primer lugar, se procedió a conocer el contexto ambiental, económico y social de la cuenca Usumacinta desde un enfoque holista para planear los alcances para describir y correlacionar las variables del proyecto. Es decir, conocer los elementos que inciden sobre el territorio, en cuanto al patrón de cambio sobre la cobertura terrestre y sus efectos en la evapotranspiración y el almacenaje de carbono en la cobertura forestal, y la relación que existe entre dichos factores. Para poder establecer este marco de conocimiento se desarrolló un Modelo Geoespacial Conceptual propuesto por Tapia (2016).

Para desarrollar el modelo geoespacial conceptual se comenzó con el planteamiento del problema, lo que requirió previamente de una búsqueda bibliográfica del tema seleccionado y plantear los objetivos de la investigación. Enseguida, se delimitó la escala espacial y temporal a usar. En este caso, fue la cuenca Usumacinta la escala espacial y la escala temporal de 10 y 6 años aproximadamente, desde 1985 hasta el 2015.

El siguiente paso fue la identificación holista de componentes, en donde se identificaron los componentes del sistema que forman parte de los subsistemas de acuerdo a las delimitaciones espaciales y temporales. Entonces, se procedió a identificar las conexiones entre grupos de componentes. Tras la identificación de componentes y sus conexiones, se procedió a jerarquizar los elementos y hacer una selección de los mismos de acuerdo con las implementaciones viables para la evaluación con SIG.

Esquema conceptual

A continuación se presenta el esquema conceptual que plasma la secuencia que se siguió en la metodología.

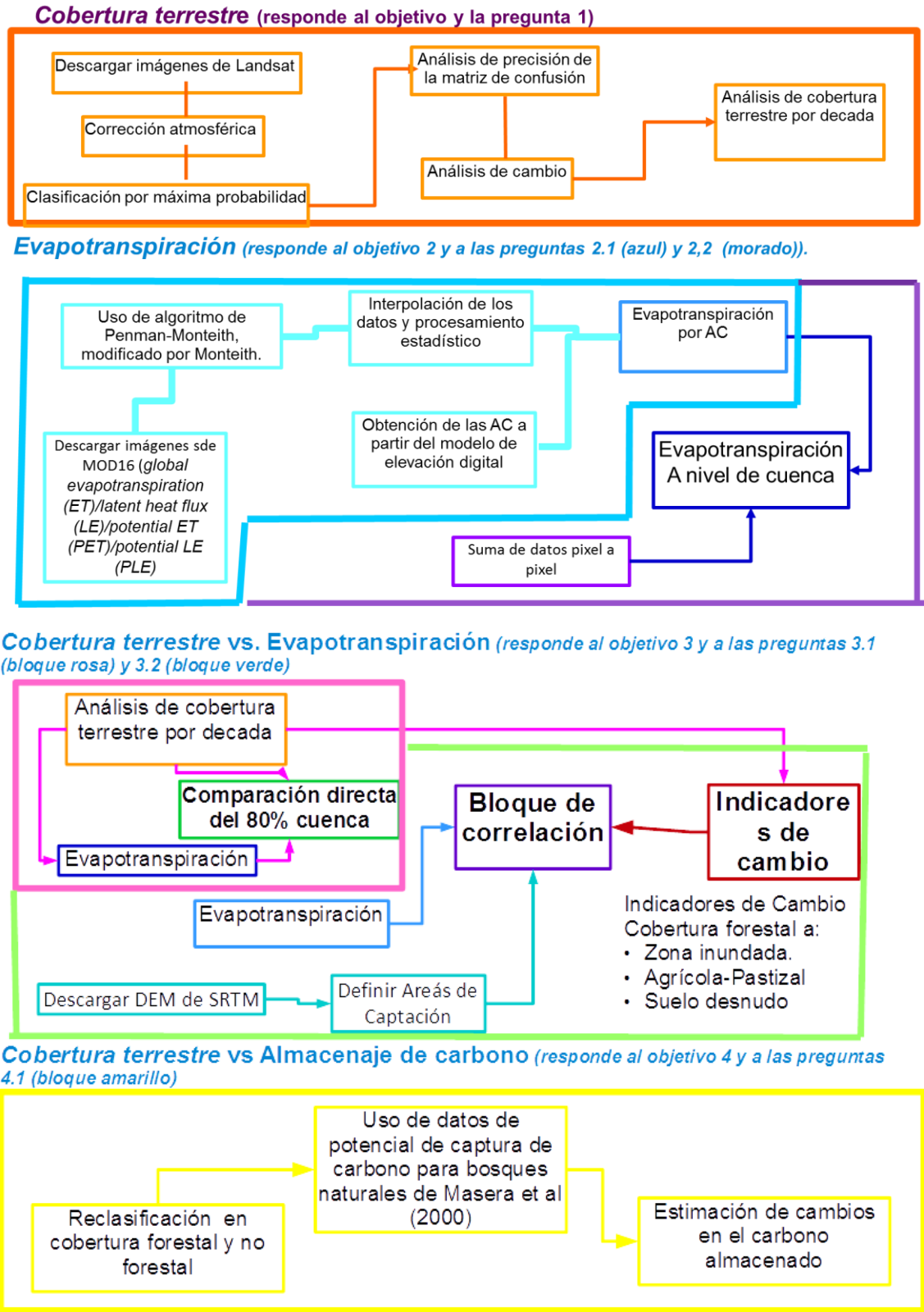


Figura 2. Esquema conceptual

El diseño del esquema conceptual (Figura 2) se realizó en cuatro etapas, de acuerdo con los

objetivos del proyecto. Este esquema fue útil para visualizar los procedimientos metodológicos que se llevaron a cabo la investigación aquí planteada.. En la primer etapa, la metodología esta diseñada para estimar los cambios en la cobertura terrestre para 1986, 1995, 2001, 2009 y 2015. En la segunda etapa, el esquema muestra el procedimiento para estimar la evapotranspiración a nivel de cuenca y de área de captación para los años 2001 y 2009. En la tercera etapa se muestra el procedimiento para realizar la estimación de los patrones de cambio en la cobertura terrestre de acuerdo con los indicadores de cambio y su correlación con los cambios de evapotranspiración. En la cuarta etapa, el esquema indica el procedimiento para estimar los cambios en la cantidad de carbono almacenado en la cobertura forestal.

Delimitación del área de estudio

El área de estudio es la cuenca Usumacinta, la cual se encuentra en el sureste de México y comparte territorio con Guatemala y Belice. Se encuentra entre las coordenadas 92° 36'53.1" O y -89°2'38.3" O de longitud y 18°32'38.4"N y 14°51'10.8" N de latitud.

Los Modelos de Elevación Digital provenientes del satélite SRTM fueron procesados para definir los límites de la cuenca a partir del análisis de conectividad hidrológica superficial (ver capítulo 3). Estas imágenes se obtuvieron de la página web: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>. De ésta página se descargaron imágenes de 90m de resolución con las coordenadas indicadas en la Tabla 1 del presente capítulo.

Tabla 1. Coordenadas de las imágenes SRTM descargadas para obtener el modelo de elevación digital (DEM)

Latitud mínima Norte	Latitud máxima Norte	Longitud mínima Oeste	Longitud máxima Oeste
15	20	95	90
10	15	95	90
15	20	90	85

Usando el programa GRASS GIS 7.0.1 GUI estas imágenes se unieron para formar una sola imagen del modelo de elevación digital y a partir de ella se generó un conjunto de capas con dirección del drenaje, acumulaciones de flujo, líneas de drenaje y cuencas hidrográficas de un millón de píxeles como valor umbral. Con esta información, en el programa QGIS 2.12 se seleccionaron las cuencas que tenían contacto con el drenaje que correspondía al área de la cuenca Usumacinta. Después se les aplicaron herramientas de geoprocso como unión y disolución de los polígonos de las subcuencas hidrográficas para formar el polígono de la cuenca Usumacinta.

Cambio de cobertura terrestre

Imágenes satelitales

Con el polígono obtenido en el paso anterior, se escogieron las imágenes satelitales que permitieron definir la cobertura terrestre. Las imágenes satelitales se descargaron de las páginas <http://glovis.usgs.gov/> y <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Las imágenes se seleccionaron con una nubosidad máxima cercana al 10%. En la tabla 2 del presente capítulo se muestran las imágenes utilizadas, el año de procedencia y el satélite utilizado.

Tabla 2. Paths/rows de las imágenes utilizadas

Satélite	Año	Path/Row	Satélite	Año	Path/Row	Satélite	Año	Path/Row
Landsat 5	1986	21/47	Landsat 5	1986	20/48	Landsat 5	1987	19/48
	1995			1995				
	2001			2001				
	2009			2009				
Landsat 8	2015	Landsat 8	2015	Landsat 8	2014			
Landsat 5	1986	21/48	Landsat 5	1986	20/49	Landsat 5	1989	19/49
	1995			1995				
	2001			2001				
	2009			2009				
Landsat 8	2015	Landsat 8	2015	Landsat 8	2015			
Landsat 5	1986	21/49	Landsat 5	1986	20/50			
	1995			1995				
	2001			2001				
	2009			2009				
Landsat 8	2015	Landsat 8	2016					

Corrección atmosférica.

Como ya se mencionó, el objetivo de la corrección atmosférica es disminuir la dispersión de la radiación electromagnética dirigida hacia el sensor. Esta corrección se realizó en el programa GRASS 7.0.1 GUI

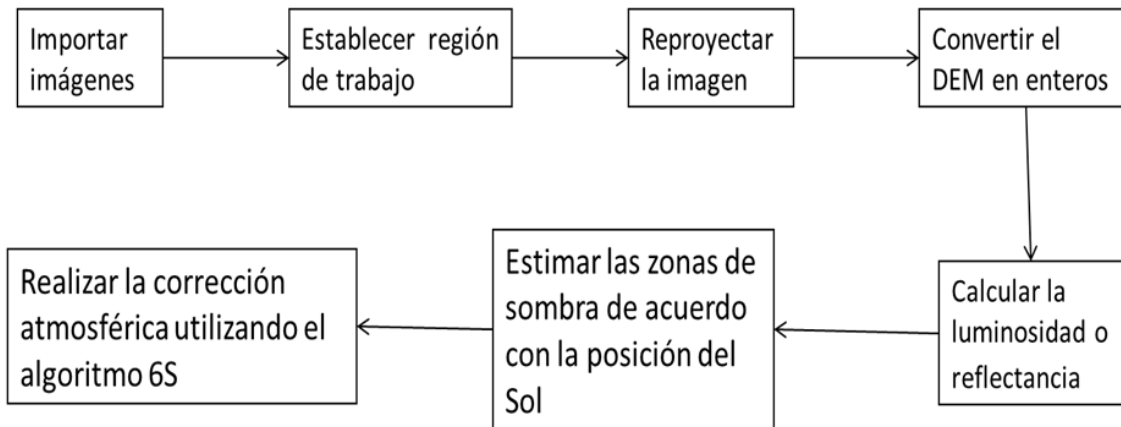


Figura 3. Diagrama de flujo para realizar una corrección atmosférica

La metodología utilizada para la corrección atmosférica se ilustra en la figura 3. Para importar las imágenes en grass 7.0.1 se utilizó el comando *r.in.gdal*. Al tener todas las bandas de una imagen en el entorno de GRASS, se estableció la región de trabajo mediante el comando *g.region*, seleccionando cualquier banda. Para reproyectar la imagen se usó el comando *r.proj*, seleccionando el método de interpolación bilinear. Para volver los valores de la reproyección en enteros se utiliza el comando *r.mapcalc*, usando como algoritmo *round (imagen reproyectada)*. Para calcular la radiancia de las imágenes satelitales se usó el comando *i.landsat.toar*. Para calcular las sombras a partir de la posición del sol se usó el comando *r.sunmask*. Finalmente, para realizar la corrección atmosférica se usó el comando *i.atcorr*. Este último comando usa el algoritmo *6s* que usa los parámetros: la condición geométrica del satélite utilizado, mes, día, hora decimal, latitud, longitud, modelo atmosférico, modelo de aerosoles, modelo de concentración de aerosoles, media de elevación sobre el nivel del mar, altura del sensor y banda del sensor.

Clasificación por máxima probabilidad y su validación

En el siguiente diagrama se muestra el procesamiento realizado en el programa GRAS 7.0.1 GUI. Las clases a determinar fueron: 1) Cobertura forestal, 2) Zona inundada, 3) Nube, 4) Uso urbano, 5) Uso agrícola-pasatizal y 6) Suelo desnudo. La ubicación de los polígonos de entrenamiento fueron seleccionados aleatoriamente. Sin embargo, cabe mencionar que se realizaron 30 polígonos para cada clase y la cobertura a clasificar en cada polígono fue corroborada en base a dos fuentes de información en el territorio mexicano: 1) las series I, II, III, IV y V de INEGI de uso de suelo y vegetación y 2) la cobertura que mostraba la imagen satelital de google earth en la actualidad. En territorio guatemalteco la corroboración de la cobertura terrestre en el pasado no fue posible ya que no se hallaron fuentes similares a la cedida por INEGI, sin embargo, se buscaron los mismos patrones que en territorio mexicano para seleccionar las clases asignadas a cada polígono.

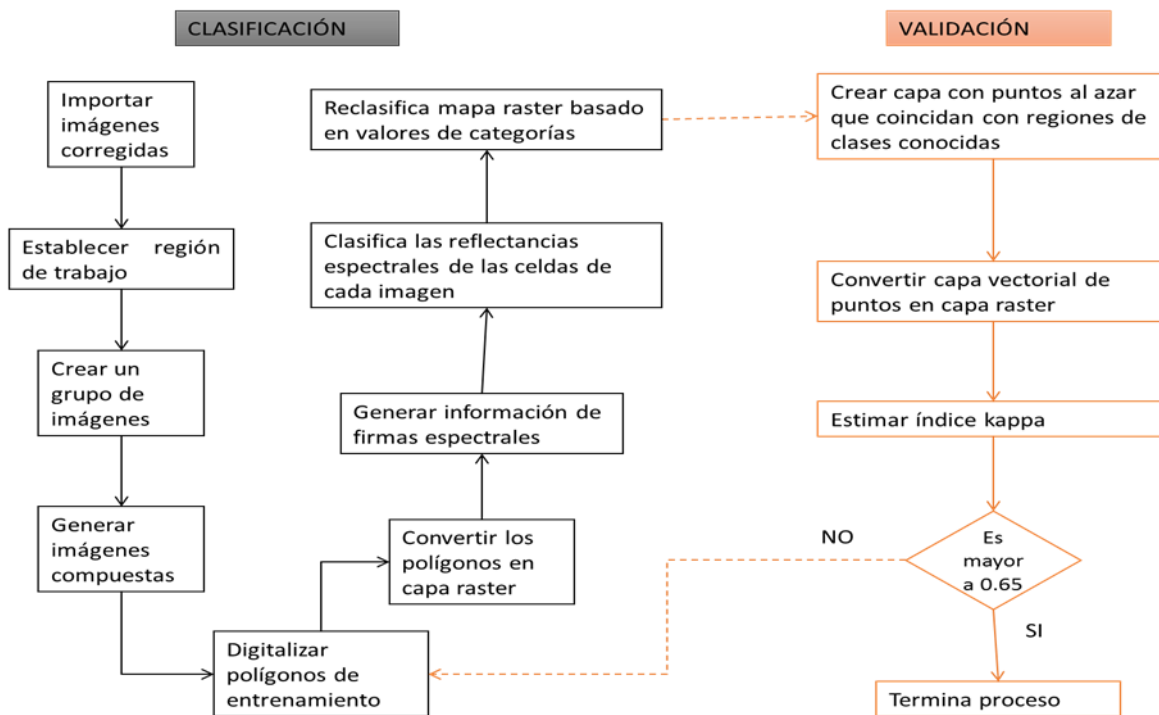


Figura 4. Diagrama de flujo para la clasificación por máxima probabilidad

La metodología utilizada para realizar la clasificación por máxima probabilidad en el programa GRASS GUI 7.0.1 que se ilustra en la figura 4 se llevo cabo de la siguiente manera: Para importar las imágenes se utilizó el comando *r.in.gdal*. Al tener todas las bandas corregidas, se estableció la región de trabajo mediante el comando *g.region*, seleccionando cualquier banda. Se generaron las imágenes con composición natural con el comando *r.composite*, usando las bandas rojo, verde y azul. En seguida, se comenzaron a digitalizar los polígonos correspondientes a cada tipo de cobertura. Cuando estuvo lista la digitalización, se convirtió el mapa vectorial a mapa raster, usando el comando *v.to.rast*. Para poder registrar las firmas espectrales de cada clase de cobertura se usó el comando *i.gensig*. Para clasificar las firmas espectrales de todas las celdas, de acuerdo con los resultados del paso anterior, se usó el comando *i.maxlik*. Finalmente, para crear un nuevo mapa con la reclasificación de los valores obtenidos en el paso anterior se utilizó el comando *r.reclass*.

Una vez lista la reclasificación, el siguiente paso fue estimar su precisión. Para ello, el primer paso fue crear un mapa de puntos al azar, con 30 puntos para cada clase, cuyo valor pertenezca a la clase correspondiente. Esto requirió tomar como base el mapa de composición natural y el mapa de polígonos, para asegurarse que los puntos tengan la clase correspondiente y a la vez, no caigan sobre píxeles ya clasificados previamente. Luego, se convirtió el mapa vectorial en mapa raster. En seguida, se procedió a estimar la precisión mediante el comando *r.kappa*. Si la precisión era menor al 0.65, la reclasificación debió repetirse nuevamente, esto de acuerdo a la escala de valores definida por Monseroud & Lemmans (1992).

Análisis de cambio de cobertura terrestre.

Las comparaciones entre resultados de la clasificación de cobertura terrestre entre años fueron: 1986 vs 1995, 2001, 2009 y 2015; 1995 vs 2001, 2009 y 2015; 2001 vs 2009 y 2015; 2009 vs 2015. Se definieron claves para las clases. Estas fueron: Cobertura vegetal=1; Zona inundada=2; Nube=3; Uso urbano= 4; Agrícola-pastizal=6 y Suelo desnudo=7. De esta manera, se implementaron operaciones de tipo 'if condición then acción1 else acción 2' anidadas para contabilizar los cambio pixel a pixel de una cobertura a otra, de un año al posterior. Un ejemplo de estas operaciones anidadas es la siguiente comparación (Figura 5):

```
cambios8595 = if( patch8489UTM@cambioscompleto ==1 &&
  patch1995UTM@cambioscompleto ==1 ,11 , if( patch8489UTM@cambioscompleto
==1 && patch1995UTM@cambioscompleto ==2 ,12 , if(
  patch8489UTM@cambioscompleto ==1 && patch1995UTM@cambioscompleto ==3
,13 , if( patch8489UTM@cambioscompleto ==1 && patch1995UTM@cambioscompleto
==4 ,14 , if( patch8489UTM@cambioscompleto ==1 &&
  patch1995UTM@cambioscompleto ==5 ,15 , if( patch8489UTM@cambioscompleto
==1 && patch1995UTM@cambioscompleto ==6 ,16 , if(
  patch8489UTM@cambioscompleto ==2 && patch1995UTM@cambioscompleto ==1
,21 , if( patch8489UTM@cambioscompleto ==2 && patch1995UTM@cambioscompleto
==2 ,22 , if( patch8489UTM@cambioscompleto ==2 &&
  patch1995UTM@cambioscompleto ==3 ,23 , if( patch8489UTM@cambioscompleto
==2 && patch1995UTM@cambioscompleto ==4 ,24 , if(
  patch8489UTM@cambioscompleto ==2 && patch1995UTM@cambioscompleto ==5
,25 , if( patch8489UTM@cambioscompleto ==2 && patch1995UTM@cambioscompleto
==6 ,26 , if( patch8489UTM@cambioscompleto ==3 &&
  patch1995UTM@cambioscompleto ==1 ,31 , if( patch8489UTM@cambioscompleto
==3 && patch1995UTM@cambioscompleto ==2 ,32 , if(
  patch8489UTM@cambioscompleto ==3 && patch1995UTM@cambioscompleto ==3
,33 , if( patch8489UTM@cambioscompleto ==3 && patch1995UTM@cambioscompleto
```

Figura 5. Operaciones anidadas para encontrar los cambios de cobertura terrestre entre dos décadas diferentes.

Los resultados que se obtienen de las operaciones anidadas (Figura 4) son de dos tipos: 1) Un mapa que muestra los cambios de cobertura y 2) la extensión en hectáreas de los cambios. Se sumaron las hectáreas cuyo cambio resultante fue forestal, zona inundada, nube, uso urbano, agrícola-pastizal y suelo desnudo. La clase nube fue removida en los resultados. La lógica del comando fue la siguiente: Si mapa 1 tiene valor A y mapa 2 tiene valor B, entonces dale el valor AB. Además se llevo a cabo estadística descriptiva para obtener las gráficas resultantes que describen el cambio de la cobertura terrestre. El comando utilizado para hacer esto fue *r.mapcalc*.

Evapotranspiración

Se descargaron los productos MODIS (MOD16) que tienen información mensual sobre la evapotranspiración real parametrizada de acuerdo al modelo de Penman-Monteith. Se seleccionó la información del año 2001 y 2009 debido a la accesibilidad de los insumos de MODIS y LANDSAT. En este sentido cabe mencionar que MODIS recopila información desde el año 2000 hasta el 2012. Al mismo tiempo, se logró rescatar imágenes satelitales de alta calidad y con poca nubosidad del satélite LANDSAT 5 de los años 2001 y 2009. La afinidad de estos dos recursos es esencial para satisfacer los objetivos de la presente investigación, la cual será evidenciada en el siguiente subtema.

Las capas de evapotranspiración fueron procesadas mediante el programa GRASS GIS 7.0.1 GUI. A continuación se muestra el diagrama de flujo que describe el procesamiento de las imágenes.

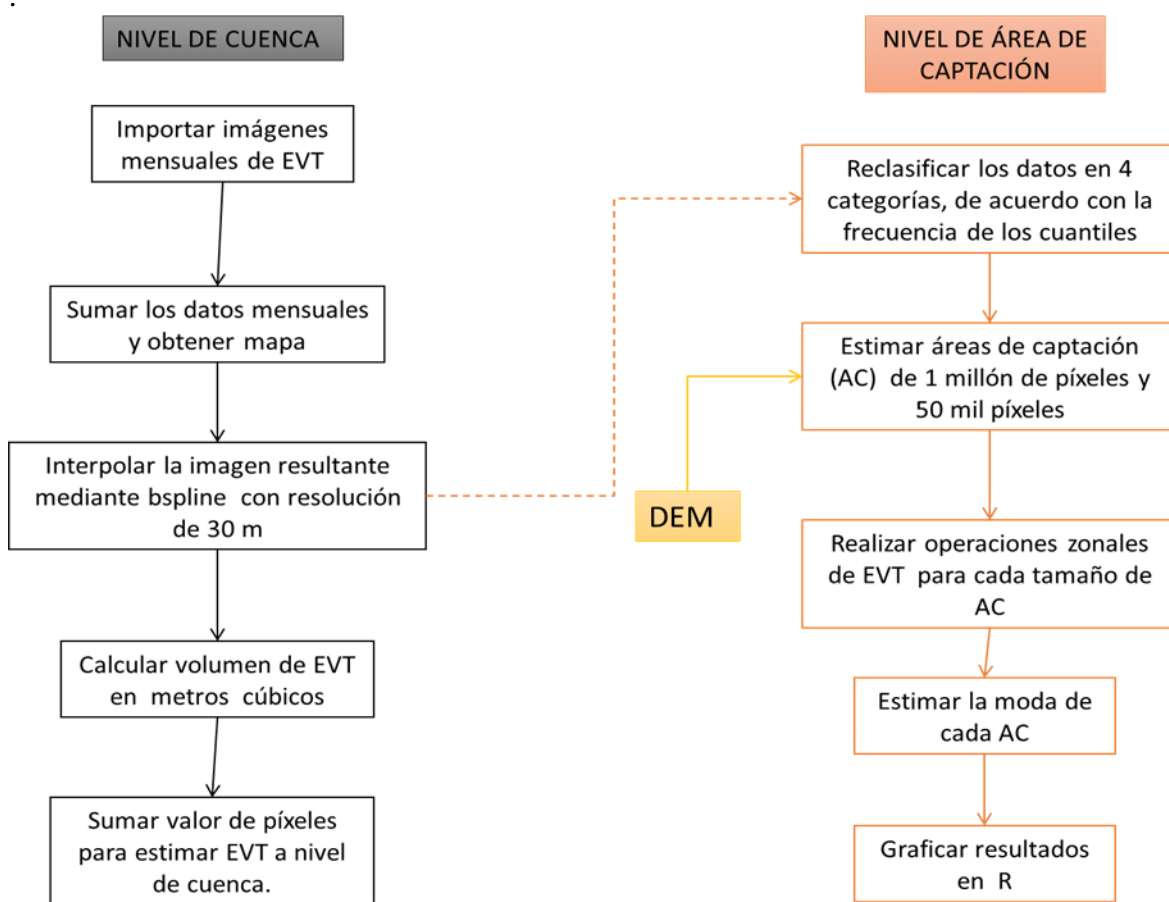


Figura 6. Diagrama de flujo que muestra el procedimiento para estimar evapotranspiración

La metodología usada para estimar la evapotranspiración (figura 6) fue la siguiente: Se descargaron los datos de evapotranspiración (EVT) obtenidos por MODIS de los años 2001 y 2009. Para cada año se sumaron los datos mensuales de evapotranspiración, para así obtener los datos anuales de EVT. En seguida se interpolaron las imágenes para reducir la

resolución de 1000 m² a 30 m² mediante el método bspline bilinear. La interpolación permitió tener valores continuos al bajar la resolución de los mapas de evapotranspiración. Después se calculó el volumen de evapotranspiración en m³ y se sumó el valor de los píxeles para obtener la evapotranspiración total de la cuenca para 2001 y 2009 respectivamente.

Por otro lado, para conocer los cambios de evapotranspiración a nivel de áreas de captación se reclasificaron los mapas interpolados en 4 categorías: Baja=1, Intermedia-Baja=2, Intermedia-Alta= 3 y Alta=4, basándose en la frecuencia indicada por los cuantiles. Además, se cuantificaron los cambios por áreas de captación de 1 millón de píxeles y 50 mil píxeles a partir del modelo de elevación digital. Para ello, se efectuaron operación zonales utilizando éstas áreas de captación y los capas reclasificadas de evapotranspiración del 2001 y 2009, seleccionando el valor más frecuente para cada área de captación.

El algoritmo utilizado en R para cuantificar la evapotranspiración por área de captación es similar para ambos años y ambos tamaños de AC, por lo que sólo se mostrará el siguiente ejemplo:

```
> datos2<-
  read.csv("E:\\Usumacinta\\RESULTADO\\comparacionEVTx
  AC1millionSinAC.csv", stringsAsFactors=T, header=T)
> str(datos2)
> matriz <- data.matrix(datos2)
> str(matriz)
> matrizTrasp <- t(matriz)
> rownames(matrizTrasp) <- c("2001", "2009")
barplot(matrizTrasp, main="Comparacion EVT", ylab="EVT
(mm)", xlab="AC", col=c("darkblue","red"), legend =
rownames(matrizTrasp), beside=T
```

Figura 7. Algoritmo para graficar en R la evapotranspiración por área de captación

Los resultados a nivel de cuenca se traducen en mapas con el valor correspondiente de evapotranspiración para cada píxel, para los años 2001 y 2009, de forma independiente para cada año. Los resultados a nivel de áreas de captación están representados en gráficas que se obtuvieron mediante operaciones zonales (figura 7) a partir de la categoría más frecuente en cada AC y se trabajaron en el programa R 3.2.2

Relación entre el cambio de cobertura terrestre y el cambio en la evapotranspiración.

Para este procedimiento se utilizaron los mapas correspondientes al año 2001 y 2009. A continuación se muestra el diagrama de flujo que describe el proceso para correlacionar el cambio de cobertura terrestre con el cambio de evapotranspiración.

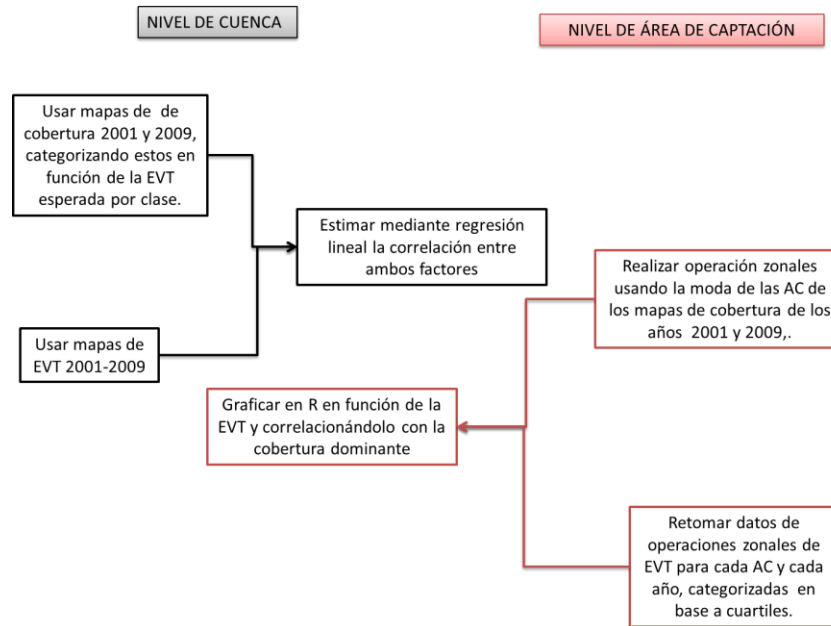


Figura 8. Diagrama de flujo que explica procedimiento para estimar la relación entre el cambio de cobertura terrestre y el cambio de evapotranspiración.

Lo que indica la figura 8 es lo siguiente: A nivel de cuenca, los mapas de cobertura terrestre del año 2001 y 2009 fueron categorizados en función de la evapotranspiración esperada por tipo de cobertura, de tal forma que: Uso urbano tuvo valor 1, porque se espera poca evapotranspiración de esta cubierta, 2 es el valor asignado a suelo desnudo, 3 es el valor dado a agrícola-pastizal, 4 es el valor de la cobertura forestal y 5, que es el valor máximo de evapotranspiración esperada se le asignó a las zonas inundadas. La cobertura nube fue clasificada como categoría nula. Estos mapas de cobertura terrestre fueron correlacionados con los mapas interpolados de evapotranspiración de los años 2001 y 2009 mediante regresión lineal.

A nivel de área de captación, se realizaron operaciones zonales (usando la moda) de los mapas de cobertura terrestre de los años 2001 y 2009. Asimismo, se usaron los mapas interpolados de evapotranspiración de 2001 y 2009, los cuales fueron categorizados. Las categorías de evapotranspiración fueron bajo, medio bajo, medio alto y alto, acotadas a partir del valor de los cuartiles de cada mapa. Al aplicar las operaciones zonales a cada variable se obtiene la categoría más frecuente en cada área de captación, ya sea de clase de cobertura o nivel de evapotranspiración. Los mapas base para las operaciones zonales fueron construidos a dos tamaños: 1 millón de píxeles y 5 mil píxeles. Después se realizó una gráfica de barras para cada tamaño de áreas de captación. En cada una de las gráficas el color asignado pertenece al tipo de cobertura predominante y el tamaño de la barra al nivel de evapotranspiración registrado en cada área de captación.

A continuación se muestra un ejemplo del algoritmo utilizado en R (Figura 9) para graficar la relación entre el cambio de cobertura y los cambios en la evapotranspiración a nivel de cuenca por área de captación.

```

CTvsEVT<-
  read.csv("G:\\Usumacinta\\RESULTADO\\ctvsevt.csv")

cols <- c("green", "red")[(CTvsEVT$CT > 1) + 1]

## Pass the colors in to barplot()

barplot(CTvsEVT$EVT, col= cols)
barplot(CTvsEVT$EVT, col= cols, legend=c("Agricultura-
Pastizal", "Cobertura Forestal"), main="Cambio en EVT vs
Categoria predominante del cambio entre 2001 y 2009",
ylab="EVT (mm)", xlab="AC de 1 millón de celdas
acumuladas")

```

Figura 9. Algoritmo utilizado para graficar la correlación de la cobertura terrestre con la evapotranspiración

Relación entre el cambio de cobertura terrestre y el almacenamiento de carbono en las superficies forestales.

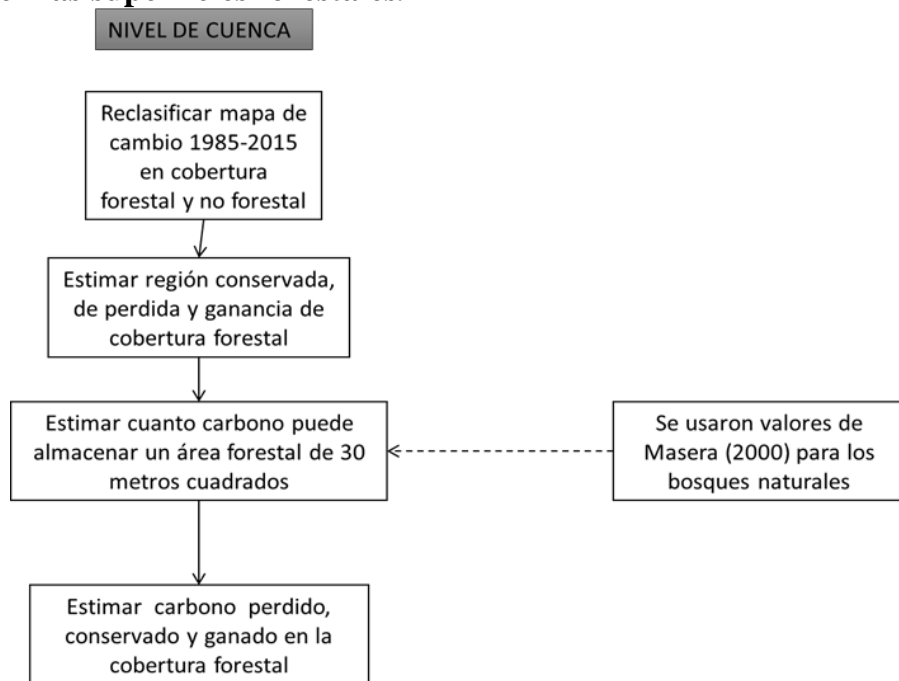


Figura 10. Diagrama de flujo para estimar la captura de carbono en la cobertura forestal en función del cambio de la cobertura terrestre.

La metodología para estimar la relación entre cambio de cobertura y pérdida / ganancia (figura 10) en el carbono almacenado en la cobertura forestal fue la siguiente. El mapa de cambio 1985-2015 se reclasificó en dos categorías: forestal o no forestal. En seguida, se estimaron las regiones conservadas, pérdidas o ganadas de cobertura forestal desde 1985 hasta el 2015. Después, se calcularon las hectáreas forestales y no forestales. Con ello, se estimó la cantidad de carbono que había en cada hectárea, usando como valor 134 tonC/H. Este valor se utilizó al ser considerado el valor intermedio entre bosques y selvas. pues de acuerdo con los resultados de Masera y otros (2000), los bosques naturales resguardan de 98 a 134 tonC/Ha, mientras que las selvas naturales resguardan 148-182 tonC/H. Esto quiere decir que para cada pixel de 900 m² de cobertura forestal se concentras 12 tonC. Finalmente, se estimó el carbono perdido, ganado o conservado desde 1985 hasta el 2015 en la cobertura forestal.

CAPITULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en el proceso de la investigación. Estos incluyen el Modelo Geoespacial Conceptual (MGC) que se desarrolló para conocer el contexto en el que se encuentra la cuenca Usumacinta en el sector social, económico y ambiental y la relación que existe entre los factores que forman parte de cada uno de estos sectores. Posteriormente se muestran los resultados del proceso y los productos de la clasificación de la cobertura terrestre de la cuenca Usumacinta. En seguida se incluye la estimación del volumen de evapotranspiración a nivel de cuenca y áreas de captación. A continuación se presentan los resultados para establecer la relación entre el cambio de cobertura terrestre y el volumen de evapotranspiración. Finalmente, se muestra la estimación del carbono almacenado en la cobertura forestal conservada, perdida y ganada.

Resultados y análisis de resultados

Modelo geoespacial conceptual

A continuación se muestra el modelo geoespacial conceptual diseñado para identificar desde un enfoque holista la red de factores que inciden sobre la cuenca Usumacinta.

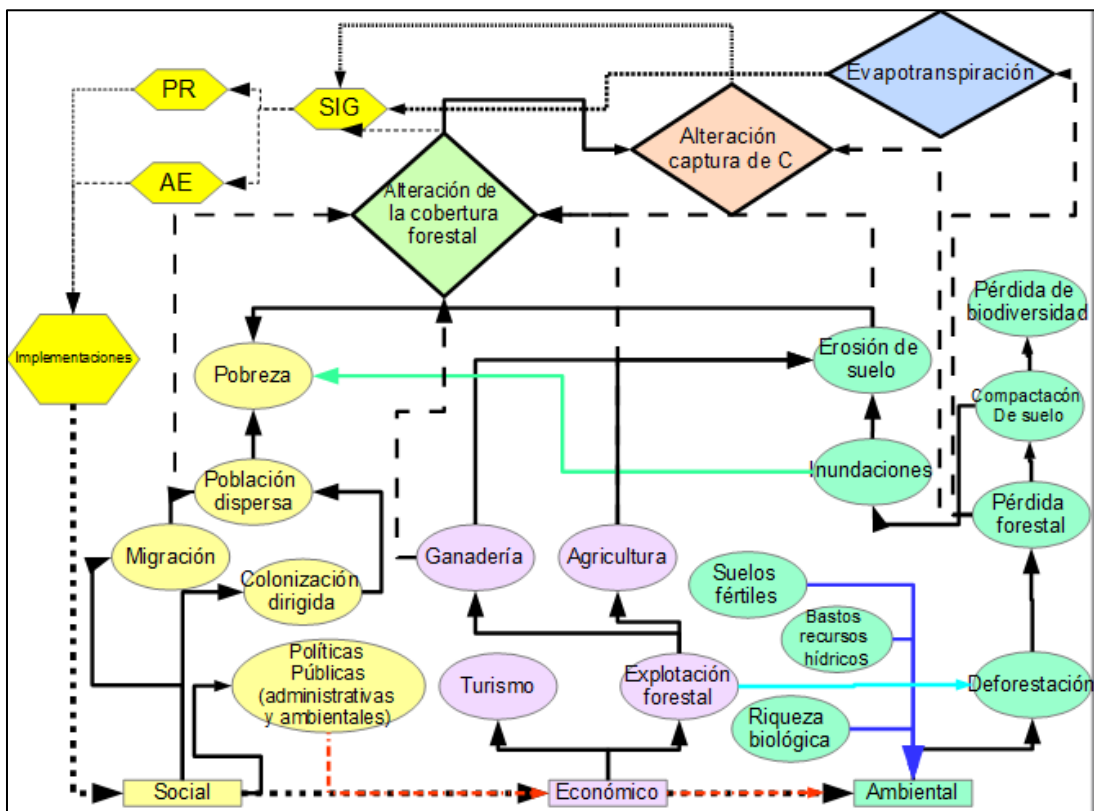


Figura 11. Modelo Geoespacial Conceptual

La implementación del modelado geoespacial conceptual (MGC propuesto por Tapia (2016) en la presente investigación tiene dos funciones principales: 1) Reconocer los factores que han incidido sobre el espacio geográfico de la cuenca Usumacinta y que la han moldeado hasta el estado actual, y 2) Ser guía en la elección de los factores clave a estudiar desde el ámbito de los SIG y que pudieran plasmar el estado de conservación o deterioro de los recursos naturales de la cuenca y además que, los resultados obtenidos de dicha selección puedan tener impacto en la toma de decisiones futuras.

El MGC planteado en la figura 11 parte de tres ejes principales: social, económico y ambiental. La selección de estos ejes, vistos en el modelo como subsistemas, permitió reconocer la relación que existe entre los componentes seleccionados y su impacto en la cobertura terrestre.

En el ámbito social destacan factores como *pobreza, población dispersa, migración y colonización dirigida* en los que se manifiestan intrínsecamente necesidades que deben ser satisfechas como vivienda, alimento, agua, etc. En el capítulo 1 del presente documento se mencionó que de acuerdo con Rodas (2010) y Cabrera y Cuc (2002) las comunidades que habitan en la cuenca Usumacinta tienen una calidad de vida precaria, por lo que suelen extraer recursos naturales sin planeación ni control. Ante estas circunstancias es imprescindible la intervención de *políticas públicas (administrativas y ambientales)* que fomenten una gestión sustentable de los recursos naturales. No obstante, las políticas implementadas hasta ahora se han caracterizado por ser restrictivas con respecto a lo que se puede hacer o no con los recursos naturales, sin tomar en cuenta las necesidades o el contexto de todos los actores involucrados. En el MGC destaca la relación que tienen las políticas públicas con el sector social, económico y ambiental (señalado por las flechas naranjas punteadas, en la base del MGC).

Con respecto al subsistema económico, se distinguieron cuatro actividades económicas que predominan en la cuenca Usumacinta: *ganadería, agricultura, turismo y explotación forestal*, como actividades extractivas y que provocan directamente el cambio de cobertura terrestre. Estas actividades no solamente inducen la tala indiscriminada, el sobrepastoreo o la compactación del suelo de la cuenca, sino que también establecen las condiciones propicias para que la vegetación primaria desaparezca del sitio en cuestión y se establezca vegetación secundaria, en caso de que pudiera implantarse algún tipo de vegetación.

En el sector ambiental destaca la riqueza biológica, los vastos recursos naturales y el fértil suelo que forman parte de la cuenca Usumacinta. Estos recursos hacen de la cuenca una de las más importantes del corredor biológico mesoamericano, como lo sugieren Tapia y Núñez (2008). No obstante, la influencia de las actividades económicas y sociales han incidido negativamente sobre los recursos naturales, provocando directa o indirectamente fenómenos devastadores como: *deforestación, compactación y erosión del suelo e inundaciones*. Estos fenómenos pueden tener consecuencias directas sobre la humanidad a nivel local, como la pérdida de bienes, pobreza, pérdida de tierras cultivables por la reducción de la fertilidad del suelo, etcétera. También hay fenómenos que ocurren en la cuenca y afectan a nivel global tales como: la *pérdida de cobertura forestal* y por ende, la

Cobertura terrestre

En este apartado se presentarán los resultados de las correcciones atmosféricas realizadas a las imágenes satelitales que pertenecen a la región de la cuenca Usumacinta, la clasificación de la cobertura terrestre que cubre a la cuenca, la estimación de la precisión de la clasificación y el análisis de cambio de cobertura entre 1985 y 2015.

Corrección atmosférica.

A continuación se muestra las imágenes de la banda roja, azul, verde e infrarrojo cercano de la imagen cuyo path/row es 21/47 del año 1986, obtenidas con Landsat 5 y las modificaciones atmosféricas correspondientes. Estas imágenes son un ejemplo de los resultados de la corrección atmosférica a la que fueron sometidas el resto de las imágenes satelitales (40 en total, con correcciones de 6 a 9 bandas cada una). (ver anexo 1)

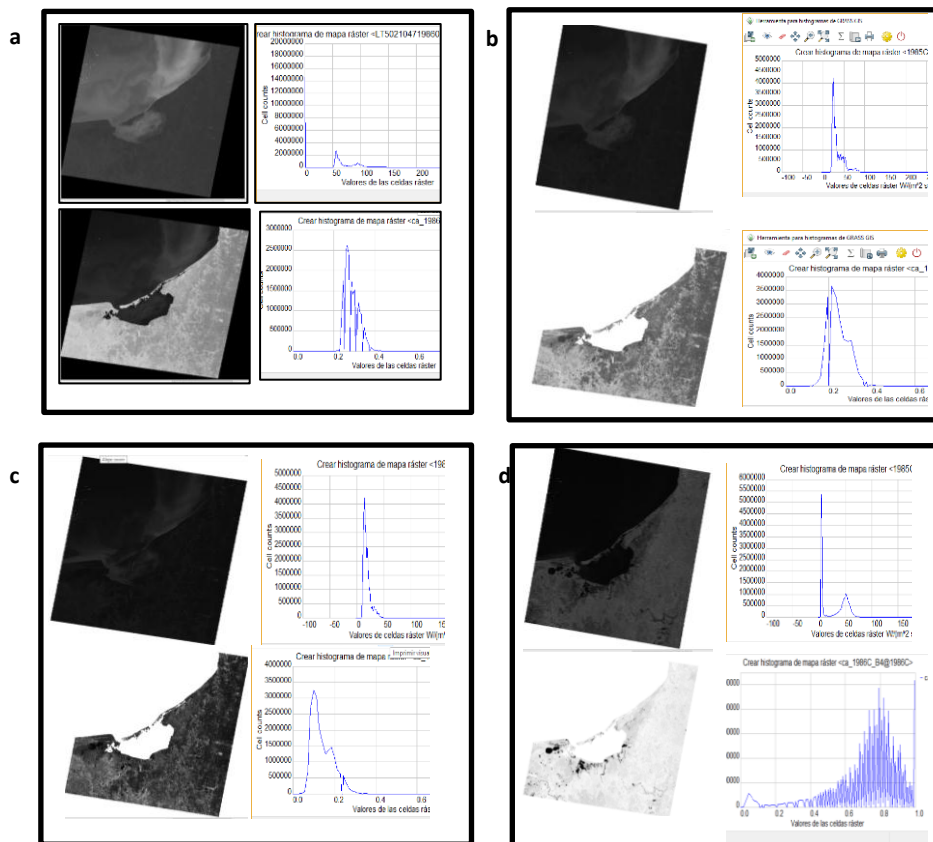


Figura 14. En cada cuadro se muestran las bandas del satélite landsat y su histograma, antes (arriba) y después (abajo) de la corrección atmosférica. a) Banda 1 azul, b) Banda 2 verde, c) Banda 3 rojo y d) Banda 4 infrarrojo.

La figura 14 muestra los cambios en las imágenes satelitales antes y después de realizar las correcciones atmosféricas. A primera vista es fácil notar que la corrección hizo las imágenes más claras y nítidas. Los cambios pueden denotarse con claridad en los histogramas. En el caso de las bandas azul, verde y rojo la reflectancia se redistribuyó hacia los valores cercanos a cero, con una distribución normal. En el caso de la banda del

infrarrojo, los valores de reflectancia se redistribuyeron hacia los valores cercanos a uno. De acuerdo con Sharma, Badarinath y Roy (2003), esto se debe a que con la corrección atmosférica es más fácil interpretar la reflectancia superficial que los números digitales originales, además de que pueden compararse con espectros de bibliotecas o de campo, lo que facilita su reconocimiento. La corrección disminuye la dispersión atmosférica e iguala las diferencias estacionales (Sharma, Badarinath, & Roy, 2003).

Clasificación por máxima probabilidad

A continuación se muestran los resultados la clasificación de cobertura terrestre (figura 14) mediante el método de máxima probabilidad para los años 1985, 1995, 2001, 2009 y 2015. A partir de estas imágenes se analizan las tendencias en los cambios de cobertura en la cuenca Usumacinta.

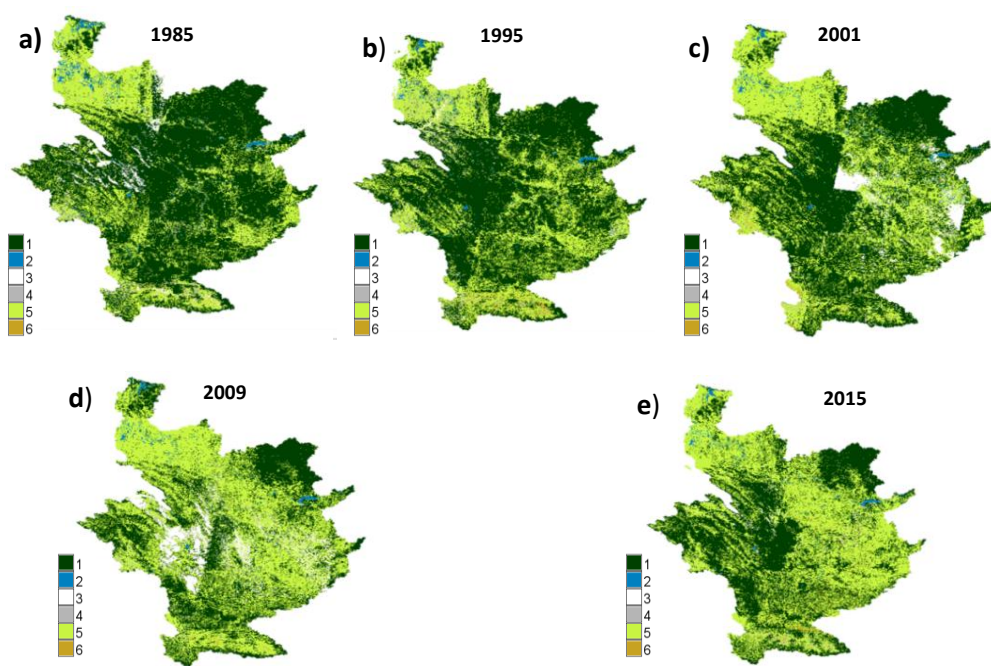


Figura 15. Clasificación de cobertura terrestre. Las coberturas son: 1) Verde oscuro es cobertura forestal, 2) Azul es zona inundada, 3) Blanco es nube, 4) Gris es uso urbano, 5) Verde claro es cobertura agrícola-pastizal y 6) Naranja es Suelo desnudo.

A simple vista, en la figura 15 se muestra la cobertura terrestre en la cuenca Usumacinta y su transformación paulatina en el tiempo. La secuencia de las imágenes denota que a pesar de que la cobertura forestal se extendía en la mayor parte de la cuenca Usumacinta durante 1985, en los años consecutivos, el principal cambio fue la pérdida de la cobertura forestal y el incremento de la cobertura agrícola-pastizal.

En la tabla 3 se muestran los promedios de los errores de comisión, omisión y del coeficiente kappa, los cuales estiman la precisión de la clasificación de cobertura terrestre mostrados en la figura 14. (Más referencias anexo 2)

Tabla 3. Promedio de índice Kappa, error de comisión y omisión.

Año	Path/Row	Confiabilidad global	Error de comisión (%)	Error de omisión (%)	Kappa (%)
1985	21/47	0.9	6.7	7.5	0.9
	21/48	0.9	3.6	4.0	0.9
	21/49	0.9	5.2	5.5	0.9
	20/48	0.9	7.2	7.3	0.9
	20/49	0.8	12.1	12.0	0.8
	20/50	0.8	15.5	20.7	0.7
	19/48	0.9	2.5	2.6	0.9
	19/49	0.8	10.1	15.8	0.8
1995	21/47	0.9	8.5	9.3	0.8
	21/48	0.9	8.2	8.7	0.9
	21/49	0.9	5.8	5.9	0.9
	20/48	0.9	2.5	2.5	0.9
	20/49	0.7	27.9	27.2	0.6
	20/50	0.8	10.4	11.1	0.8
	19/48	0.8	14.9	14.6	0.8
	19/49	0.9	7.7	9.1	0.8
2001	21/47	0.9	6.7	9.2	0.8
	21/48	0.7	21.3	10.0	0.6
	21/49	0.9	2.6	2.6	0.9
	20/48	0.8	14.6	17.2	0.7
	20/49	0.9	8.7	8.9	0.8
	20/50	0.6	29.5	20.5	0.7
	19/48	0.9	4.6	5.0	0.9
	19/49	0.8	12.4	15.0	0.8
2009	21/47	0.8	17.8	18.0	0.7
	21/48	0.8	16.8	18.0	0.7
	21/49	0.8	18.1	18.0	0.7
	20/48	0.8	14.0	14.0	0.8
	20/49	0.6	26.8	28.9	0.6
	20/50	0.7	15.2	25.5	0.6
	19/48	0.8	10.7	19.3	0.7
	19/49	0.6	36.0	16.6	0.5
2015	21/47	0.8	24.3	33.9	0.6
	21/48	0.8	9.2	13.4	0.8
	21/49	0.9	3.1	3.3	0.9
	20/48	0.7	14.4	13.3	0.6
	20/49	0.8	17.1	19.4	0.7

	20/50	0.7	23.6	10.8	0.6
	19/48	0.8	9.1	13.3	0.8
	19/49	0.9	2.0	2.2	0.9
Promedio total		0.8	12.7	13.0	0.8

El promedio de kappa (Tabla 3) de todas las imágenes es de 0.8 lo que soporta una clasificación robusta, de acuerdo con Monserud y Leemans (1992) que mencionan que cuando kappa es mayor a 0.75 existe un buen nivel de coincidencia entre los resultados de la clasificación y los datos de referencia.

El coeficiente kappa se obtuvo de las matrices de confusión de cada una de las imágenes clasificadas. El promedio de estas capas se extraen en la tabla 3. Los errores de comisión se refieren a aquellos pixeles que fueron asignados a cierta clase, perteneciendo a otra. El promedio más alto asignado al error de comisión fue en el año 2001 y 2009, alcanzando valores 36.0% y 29.5% respectivamente.

Por otra parte, los errores de omisión son aquellos que perteneciendo a una misma clase se les asignó a clases diferentes. El promedio más alto de los errores de omisión ocurrió en los años 2015 con un valor de 33.9%, seguido por los años 2009 y 1995 con un valor promedio de 28.9% y 27.2% respectivamente. Estos errores se cometieron principalmente a la categoría nube, uso urbano, agrícola-pastizal y suelo desnudo. A este respecto debe decirse que la cobertura nube causó algunos problemas en la clasificación y por tanto en el análisis del cambio de cobertura. Esto ocurrió debido a que en la superficie periférica de las nubes, el clasificador no logro diferenciar la respuesta espectral de la cobertura urbana con el de la cobertura nube, confundiendo a la última con la primera. Asimismo, las clases que tuvieron menos errores fueron las clases cobertura forestal y zona inundada.

En la tabla 4 se muestra el área ocupada de cada clase de cobertura, para cada uno de los años evaluados.

Tabla 4. Extensión de cada clase de cobertura terrestre en el tiempo

Forestal		Zona Inundada		Urbano		Agrícola-Pastizal		Suelo Desnudo	
Año	Área (Ha)	Año	Área (Ha)	Año	Área (Ha)	Año	Área (Ha)	Año	Área (Ha)
1985	4,627,687	1985	109,576	1985	165,500	1985	2,179,075	1985	21,618
1995	4,370,313	1995	82,352	1995	208,840	1995	2,492,570	1995	62,661
2001	3,868,840	2001	98,826	2001	95,235	2001	2,886,951	2001	41,829
2009	2,722,212	2009	75,393	2009	189,798	2009	3,796,531	2009	14,075
2015	3,317,941	2015	73,653	2015	92,188	2015	3,667,772	2015	91,464

En la figura 16 se muestran las gráficas que representan el área que ocupa cada clase de cobertura en cada año. Al leer las gráficas debe ponerse especial cuidado en las escalas, ya que varían en magnitud. Las de cobertura forestal y agrícola pastizal está en millones y las restantes en cientos de miles de ha.

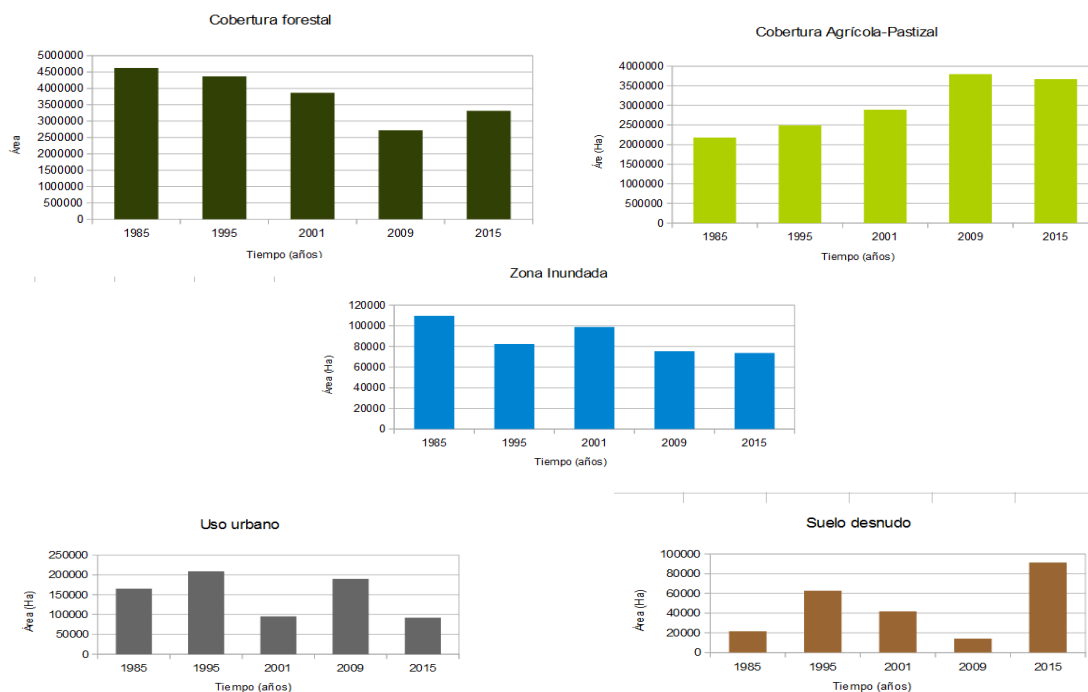


Figura 16. Gráficas de la extensión que ocupa cada cobertura forestal cada año evaluado.

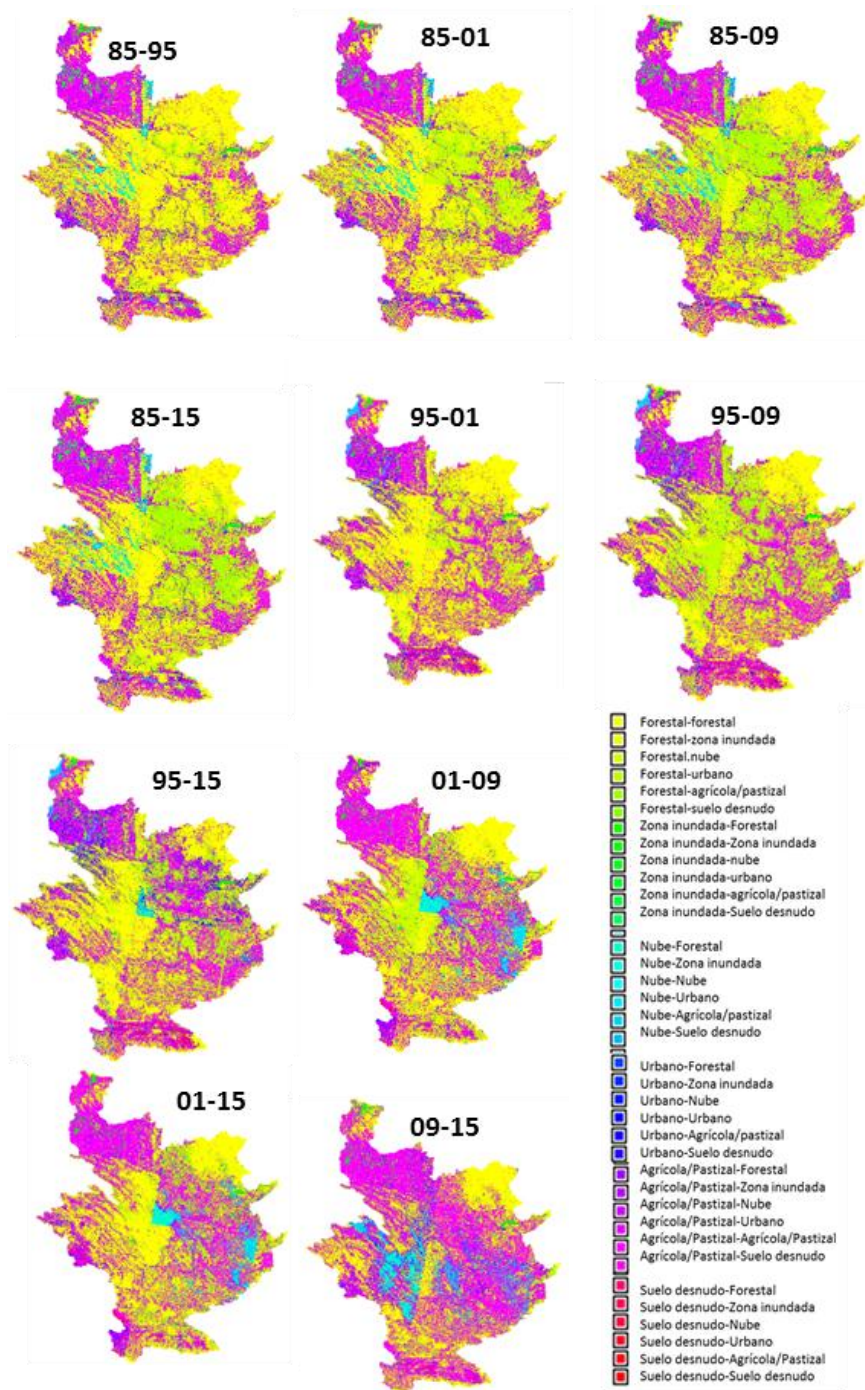
En la figura 16 y en la tabla 4 se incluye la extensión de cada una de las coberturas en cada año evaluado. En el caso de la cobertura forestal se nota una evidente disminución desde 1985 hasta el 2009, aunque hubo un pequeño repunte en el 2015. Por otro lado, la cobertura agrícola/pastizal ha aumentado exponencialmente en el tiempo, aunque ha sido sujeta a una ligera disminución en el 2015. La extensión de las zonas inundadas ha permanecido más o menos constante en el tiempo, a excepción de los años 1985 y 2001, donde el área que ocupaban era mayor que el resto de los años. Cabe destacar que durante 1985, el área ocupada por el agua superficial en la cuenca fue mucho mayor que el resto de los años y que esto coincide con que la extensión de la cobertura forestal fue la más vasta durante el período de tiempo evaluado. Con respecto a las coberturas uso urbano y suelo desnudo existen variaciones que podrán ser explicadas con mayor claridad en el siguiente subtema.

Análisis de cambio de la cobertura terrestre

En la figura 17 se muestran los mapas resultantes que muestran los cambios de una cobertura a otra, cuyas comparaciones ocurrieron entre los años: 1985 vs 1995, 2001, 2009 y 2015; 1995 vs 2001, 2009 y 2015; 2001 vs 2009 y 2015; 2009 vs 2015.

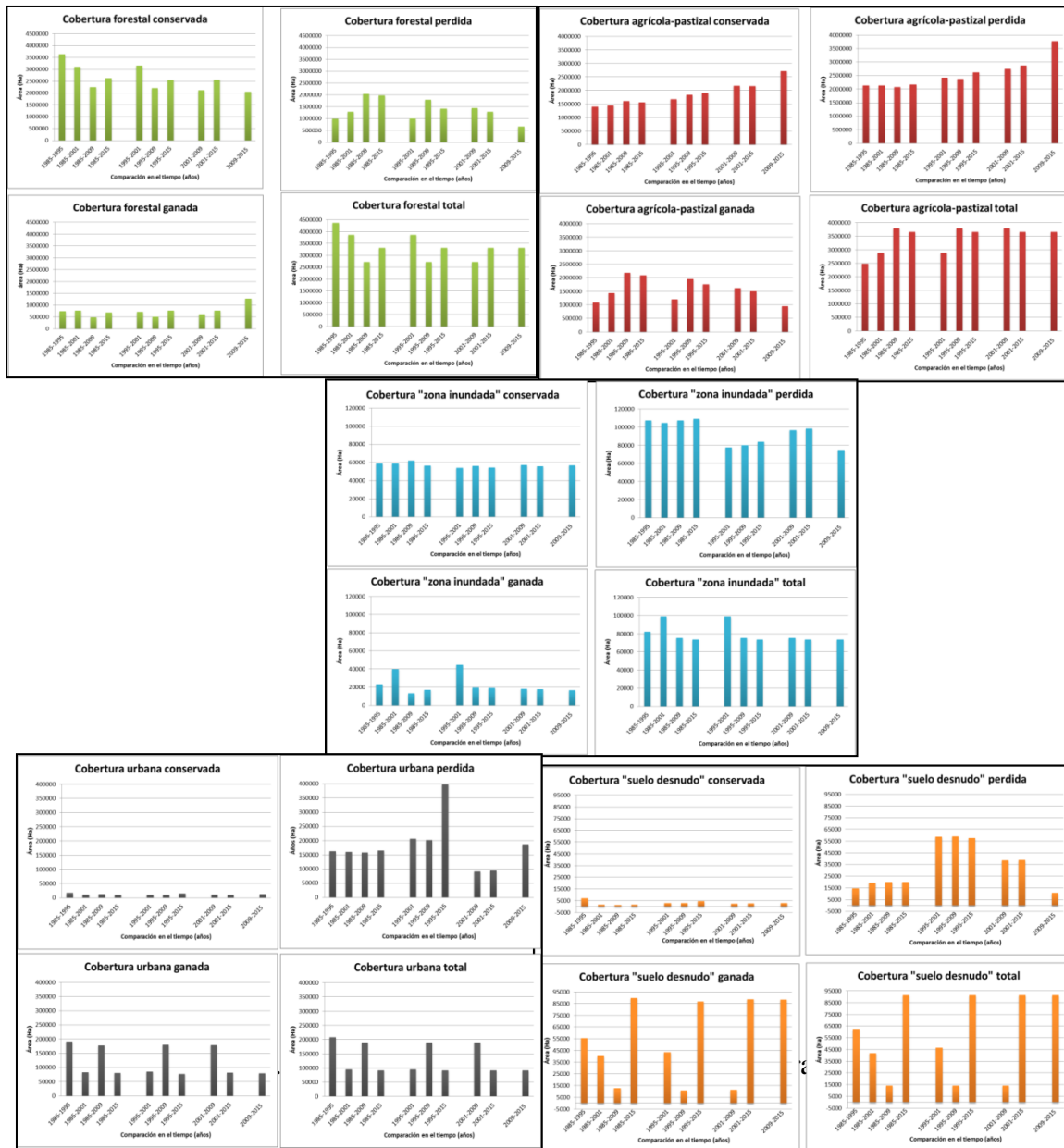
En este sentido, en los mapas de la figura 17 se observa los cambios paulatinos en la cobertura de la cuenca Usumacinta de manera paulatina. En primer lugar, se debe poner

atención a los píxeles amarillos y verdes, ya que estos son cambios frecuentes en todos los mapas. Los píxeles amarillos suelen representar a los cambios forestal-forestal principalmente. En cambio, los píxeles amarillo-verde suelen manifestar el cambio forestal-agrícola/pastizal en la mayor parte de los casos. Esta predominancia es muy visible en los mapas cuya comparación es con respecto al año 1985. En cambio, en los mapas que se comparan con los mapas de 1995 es notorio el cambio ocurrido en los primeros años del estudio, ya que incrementaron los píxeles rosas, que son característicos de la cobertura agrícola-pastizal. En las comparaciones realizadas con el año 1995 se sigue observando predominancia de píxeles amarillos y los píxeles amarillo-verde. Con respecto a los años consecutivos es notoria la reducción de la cobertura forestal, que ha sido consecuencia de los cambios señalados anteriormente. Al mismo tiempo es evidente el aumento de la cobertura agrícola-pastizal, de la cual se observa el incremento paulatino con respecto a las comparaciones de los años anteriores. En estos últimos años también destaca la presencia de cambios de la cobertura nube, la cual sólo funge como una máscara que evita conocer los cambios en la cobertura.



Figurara 17. Mapas de cambio de cobertura terrestre a través del tiempo en la cuenca Usumacinta.

Uno de los productos obtenidos por los mapas de la figura 16 es la extensión en hectáreas de cada uno de los indicadores de cambio. Estos datos se muestran en las gráficas de la figuras 18 (ver anexo 3).



Para interpretar las gráficas de las figuras 18 se pueden determinar tres aspectos importantes: 1) Cada una de las barras corresponde a un periodo de tiempo comparado de forma consecutiva, es decir, del más antiguo al más reciente; 2) En cada gráfica existen 4 grupos de barras, al primero pertenecen todas las comparaciones realizadas con 1985, al segundo todas las comparaciones relacionadas con 1995, al tercero con el 2001 y al cuarto con el 2009 y 3) El primer grupo de barras tiene períodos de comparación de 10, 16, 24 y 30 años, el segundo bloque tiene periodos de comparación de 6, 14 y 20 años, el tercer grupo tiene periodos de comparación de 8 y 14 años, y el último tiene un rango de comparación de 6 años.

La figura 18 muestra el análisis de cambio de la cobertura forestal. En la gráfica de cobertura conservada se observa que la cobertura disminuyó intensamente desde 1985 hasta 2009. Por su parte, el área perdida de cobertura forestal manifiesta crecimiento acelerado, a excepción de la comparación 2009-2015, donde se disminuye el área perdida. Por su parte, el área de cobertura forestal ganada fue más o menos constante, a excepción del último período de comparación que tiende a crecer. En estas gráficas también se puede observar que la superficie de cobertura ganada más alta, que fue de 1 millón de hectáreas aproximadamente durante el período 2009-2015, no recompensa el área perdida, ya que está lejos de ser de hasta 2 millones de hectáreas durante el período 1985-2009. Esto coincide con los resultados de la cobertura forestal total, donde se observa que a pesar de que en los períodos más antiguos había una gran cobertura forestal conservada, la cobertura forestal añadida en los últimos años ha menguado muy poco la extensión de la deforestación.

Por otro lado, las gráficas relacionadas con el análisis de cambio de la cobertura agrícola-pastizal (figura 18) muestran lo siguiente: En la gráfica de cobertura conservada se puede ver que mantuvo la tendencia a tener extensiones más o menos constantes con respecto al mismo año mismo año base. Por su parte, la cobertura agrícola-pastizal ganada tiene un crecimiento constante desde 1985 hasta 2009, pero esta tendencia no sólo desacelera, sino que disminuye durante el período 2009-2015. Con respecto a la cobertura perdida se observa una clara tendencia a aumentar su extensión, sobre todo en los últimos años, lo que quiere decir que las áreas destinadas a la cubierta agrícola-pastizal han disminuido, convirtiéndose en otro tipo de cobertura.

Con respecto a la cobertura zona inundada (figura 18), en la gráfica de cobertura conservada se observa que cerca de 60000 de hectáreas es la cantidad de superficie que está constantemente cubierta por agua. Las pérdidas de superficie inundada son mucho mayores (80 % aproximadamente, por grupos de comparación con un año base) que la superficie ganada. La cantidad total de superficie inundada por periodos de comparación con un mismo año base es de 75000 u 80000 hectáreas para el año base 1985, 75000 hectáreas para 1995 y los años posteriores, excepto los períodos relacionados con el año 2001. Por su parte, los años relacionados con el 2001 destaca del resto de los resultados por su aumento, lo que sugiere que es un año de mucha disponibilidad de agua, en el que se inundaron cerca de 100000 hectáreas.

Con respecto al cambio de cobertura urbana (figura 18) se observa que la extensión de la cobertura conservada permanece constante. Las gráficas de la extensión de la cobertura perdida suele permanecer constante, mientras que la cobertura ganada y total muestran variaciones inesperadas para la cobertura urbana, ya que en ella se esperaría que el crecimiento fuera siempre positivo. Anteriormente ya se había explicado que la clasificación de la cobertura urbana fue inexacta por la confusión que tuvo con la cobertura nube. De hecho, las coberturas de 1985, 1995, 2001 y 2009 tienen nubes que intervienen en la clasificación (ver figura 14), de tal modo que los períodos donde aumenta o disminuye la cobertura inesperadamente se debe a que la periferia de las nubes fue confundida con uso urbano

Finalmente, en la cobertura suelo desnudo se observa que la cobertura conservada

permanece más o menos constante, con una extensión promedio de 3000 hectáreas. Con respecto a la cobertura perdida se nota una extensión constante entre períodos con el mismo año base de comparación. No obstante, en la cobertura ganada y total se observan grandes variaciones, donde las extensiones mínimas fueron de 11000 y 14 000 hectáreas respectivamente, mientras que las máximas fueron de 89900 y 91500 hectáreas respectivamente. Esto puede tener explicación. Estas variaciones pueden deberse a que la extensión de suelo desnudo se vea afectada por actividades agrícolas como el arado..

Para comparar nuestros resultados con estudios previos, comenzaremos mencionando el trabajo realizado por Tapia-Silva, Mora y Núñez (2007) que estuvo destinado a caracterizar las cuencas del corredor biológico mesoamericano. Entre los resultados que obtuvieron se encuentra la caracterización de la cubierta forestal de la cuenca Usumacinta entre los años 1990 y 2000. En dicho estudio estimaron que durante 1990 el 63% de la cuenca estaba cubierta por comunidades forestales, mientras que en el año 2000, está sólo cubría el 48%, lo que implica que hubo una tasa de deforestación de 2.26% (Tapia-Silva, Mora , & Núñez, 2007). Con respecto a nuestros resultados, esto coincide con la pérdida de cobertura forestal que estimamos entre los 1995 y 2001, aunque diferimos un poco en los porcentajes, ya que de acuerdo con los datos de la tabla 4, la cobertura forestal ocupó el 59.98% durante 1995 y el 53.09% durante el 2001.

Posteriormente, Kolb (2013) realizó un estudio en el que encontró que desde 1993 hasta el 2007 cambiaron 503 404 ha de cobertura forestal y aumentaron 392 000 hectáreas a cobertura pastizal y 264 000 ha las áreas agrícolas. Las coincidencias entre los resultados de nuestra investigación y los de Kolb (2013) se centran en que la cuenca sufrió una alta tasa de deforestación, y en que las coberturas agrícola y pastizal aumentaron. Sin embargo, no es factible comparar la extensión de las áreas deforestadas o cultivadas, pues el área de estudio de Kolb se limita al área mexicana de la cuenca Usumacinta, lo cual disiente con la extensión del estudio que aquí se presenta. En este sentido es importante resaltar que no se encontraron estudios que se enfocaran en el cambio de cobertura terrestre en la cuenca Usumacinta durante el mismo periodo de estudio ni con la misma extensión, ya que algunos se limitaban a municipios o estados. Los estudios de mayor extensión fueron los mencionados anteriormente.

Evapotranspiración

La evapotranspiración (EVT) de los años 2001 y 2009 se representa en los mapas de la figura 19.

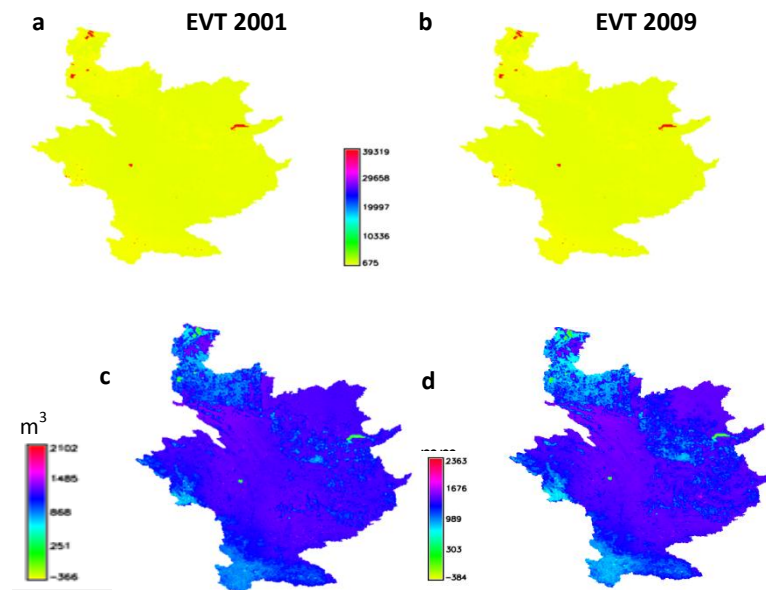


Figura 19. Mapas anuales de evapotranspiración (a) y (b) de los años 2001 y 2009, (c) mapa de evapotranspiración interpolada (c) en m³ y (d) en mm

Los mapas (a) y (b) de la figura 19 son los resultantes de la suma de la evapotranspiración mensual para la cuenca Usumacinta. Los mapas (c) y (d) son el resultado de la interpolación de los primeros, obteniendo una resolución por pixel de 30 x 30 metros

Evapotranspiración a nivel de cuenca.

Para estimar la evapotranspiración a nivel de cuenca fue necesario convertir los datos de evapotranspiración de los mapas reescalados de milímetros a metros cúbicos (figura 19 c y d). Estos datos se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Datos de evapotranspiración en metros cúbicos.

AÑO	EVT (m3)
2001	96 883 517 333.8472
2009	96 018 000 905.0518
Pérdida capacidad evaporativa 2001-2009	865 516 428.7954

A nivel de cuenca, los cambios de la capacidad evaporativa entre el 2001 y el 2009 fue del 0.11% de acuerdo con los datos de la tabla 5. Estos datos no pueden compararse con otros estudios previos, ya que no se hallaron investigaciones que dedujeran la pérdida de capacidad evaporativa en la cuenca Usumacinta.

Evapotranspiración a nivel de áreas de captación.

En la tabla 6 se presentan los cuartiles de los valores de evapotranspiración para los años 2001 y 2009. Los datos categorizados se tomaron de los mapas interpolados de evapotranspiración (figura 19), los cuales se caracterizan por tener valores continuos. Esto representa un problema cuando se quiere extraer información puntual, como en este caso es conocer los niveles de evapotranspiración por área de captación. Para lograr este fin, se usan los cuartiles como una forma de dividir la muestra en grupos de igual frecuencia, lo que facilita la categorización.

Tabla 6. Categorización de evapotranspiración basada en los cuartiles de las muestras de 2001 y 2009

Nivel de EVT	Rango 2001	Rango 2009
Baja	$X < 1260.429$	$X < 1213.850$
Media baja	$1260.429 \leq x < 1398.681$	$1213.850 \leq x < 1393.918$
Media alta	$1398.681 \leq x < 1439.648$	$1393.918 \leq x < 1471.413$
Alta	$X \leq 1439.648$	$X \leq 1471.413$

En la figura 20 se muestran las áreas de captación de 1 millón y 50 mil píxeles.

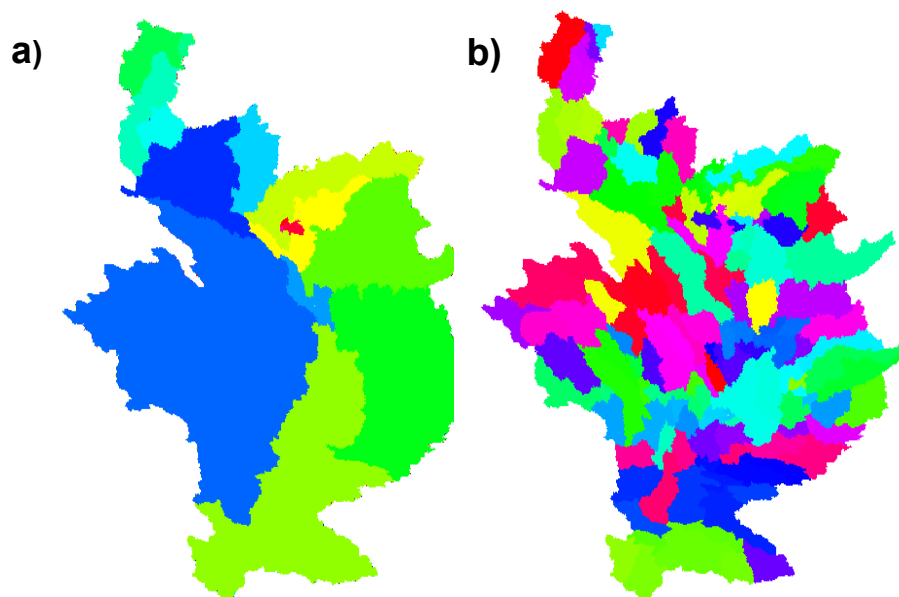


Figura 20. Áreas de captación (AC) de (a) 1 millón y (b) 50 mil píxeles, las AC se diferencian por color.

La comparación de los datos de evapotranspiración entre 2001 y 2009 categorizados se muestra en las gráficas de la figura 21 (ver anexo 4).

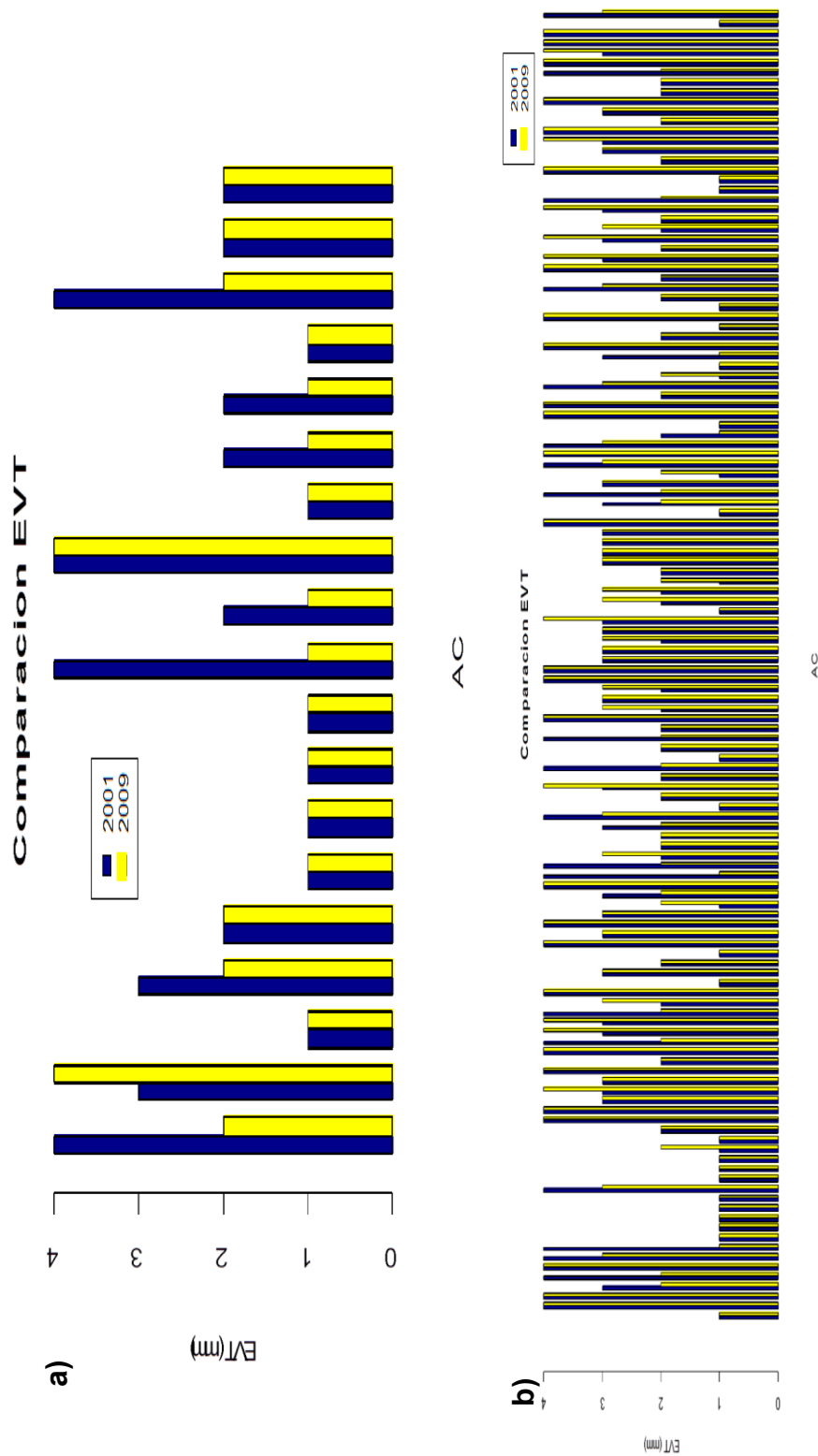


Figura 21. Comparación de la evapotranspiración anual durante 2001 y 2009, para áreas de captación de 1 millón (a) y 50 mil (b) píxeles aproximadamente.

Al comparar los niveles de evapotranspiración de las áreas de captación (AC) de un millón de píxeles (Figura 21 (a)) es claro ver que durante el 2001 hubo mayor volumen de

evapotranspiración que durante el 2009 en ciertas AC (42%), aunque en el 58% de las áreas de captación el nivel de evapotranspiración fue el mismo en ambos años. En cuanto a las AC de 50 mil píxeles (Figura 21 (b)), el fenómeno fue el mismo. Durante el 2001 hubo mayor volumen de evapotranspiración que en el 2009. De manera cuantitativa, el 18.6 % (25 AC) tuvo mayor volumen de evapotranspiración durante el 2001, el 14.9% (20 AC) tuvo mayor volumen de evapotranspiración durante el 2009, mientras que el 66% (89 AC) tuvo el mismo nivel de evapotranspiración durante el 2001 y el 2009.

Relación entre cobertura terrestre y evapotranspiración

Relación entre el cambio de cobertura terrestre y la evapotranspiración a nivel de cuenca

A nivel de cuenca la estimación de la relación que existe entre la cobertura terrestre y el volumen de evapotranspiración se realizó en función de los mapas de evapotranspiración interpolados 2001 y 2009 y los mapas de cobertura terrestre en 2001 y 2009 clasificados en función de la evapotranspiración esperada. Estos mapas se muestran en la figura 22.

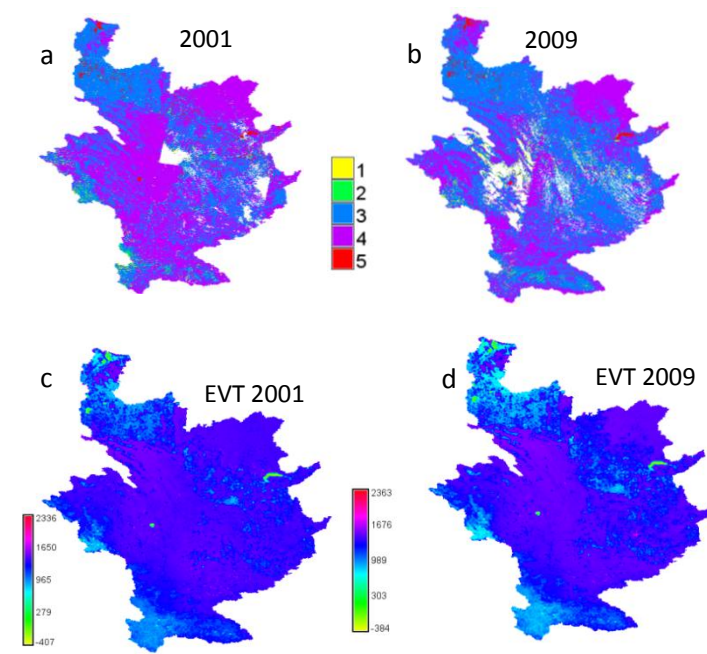


Figura 22. La figura (a) y (b) muestran la cobertura categorizada de los mapas 2001 y 2009. La categoría indicada en la leyenda corresponde a la evapotranspiración esperada (en orden ascendente), de acuerdo con la cobertura terrestre, de tal forma que: nube tiene valor nulo, 1 corresponden a los píxeles de uso urbano (EVT esperada: muy baja), 2 son los píxeles de suelo desnudo (EVT esperada: baja), 3 pertenece a la cobertura agrícola pastizal (EVT esperada: nivel intermedio) 4 es cobertura forestal (evapotranspiración esperada: alta) y 5 son zonas inundadas (EVT esperada: muy alta) Los mapas (c) y (d) son los mapas de evapotranspiración interpolados del 2001 y 2009

<p>a</p> <p>a (Offset): 1059.063505 b (Gain): 75.693002 R (sumXY - sumX*sumY/N): 0.264923 N (Number of elements): 77670437 F (F-test significance): 5862698.689801 meanX (Mean of map1): 3.548427 sdX (Standard deviation of map1): 0.607910 meanY (Mean of map2): 1327.654576 sdY (Standard deviation of map2): 173.690334</p>	<p>b</p> <p>a (Offset): 1179.723983 b (Gain): 38.730164 R (sumXY - sumX*sumY/N): 0.119494 N (Number of elements): 75517615 F (F-test significance): 1093926.798704 meanX (Mean of map1): 3.364705 sdX (Standard deviation of map1): 0.652375 meanY (Mean of map2): 1310.039567 sdY (Standard deviation of map2): 211.446075</p>
--	--

Figura 23. Resultados obtenidos mediante regresión lineal de la correlación pixel a pixel de la cuenca Usumacinta (a) 2001 y (b) 2009

En la figura 23 se muestran los resultados de la regresión lineal entre la cobertura terrestre categorizada en función de la evapotranspiración esperada y los valores de evapotranspiración. De acuerdo con los datos obtenidos en la regresión lineal, la correlación entre la cobertura terrestre y la evapotranspiración fue muy baja, pues los valores obtenidos fueron 0.26 y 0.11 respectivamente. Esto quiere decir que a nivel de cuenca no es factible usar el cambio de cobertura terrestre como único factor que pueda afectar a la evapotranspiración. En este sentido, cabe recordar que la evapotranspiración es un fenómeno que combina la evaporación superficial y la transpiración de las plantas, y además, la disminución de un factor induce al crecimiento del otro, como ya se explicó en el capítulo 1, lo que evita visualizar de forma aislada el impacto del cambio de cobertura terrestre sobre la evapotranspiración. No obstante, cabe resaltar que aunque la correlación es muy baja, si existe una reducción de un poco más de la mitad entre la correlación del 2001 y del 2009. Además, en los resultados concernientes al cambio de cobertura terrestre se registró entre el 2001 y el 2009 la pérdida de 1,146,628 hectáreas de cobertura forestal. Esto sugiere que la pérdida de cobertura forestal si puede tener cierto impacto en la evapotranspiración, aunque la cobertura forestal no sea una variable que afecte por sustancialmente a la evapotranspiración.

Relación entre el cambio de cobertura terrestre y la evapotranspiración a nivel de áreas de captación.

La relación que existe entre el volumen de evapotranspiración en función del tipo de cobertura se muestra en la figura 24 (ver anexo 5). La evapotranspiración fue categorizada en base a los cuartiles y las coberturas preponderantes en las áreas de captación fueron: forestal y agrícola-pastizal.

En la figura 24 y 25 los resultados deber leerse de la siguiente forma: El color de las barras determina qué tipo de cobertura predomina en cada área de captación, obtenido mediante una operación zonal considerando la moda del valor de cobertura. El tamaño de la barra define el volumen de la evapotranspiración en cuatro niveles, alto (4), medio alto (3), medio bajo (2) y bajo (1).

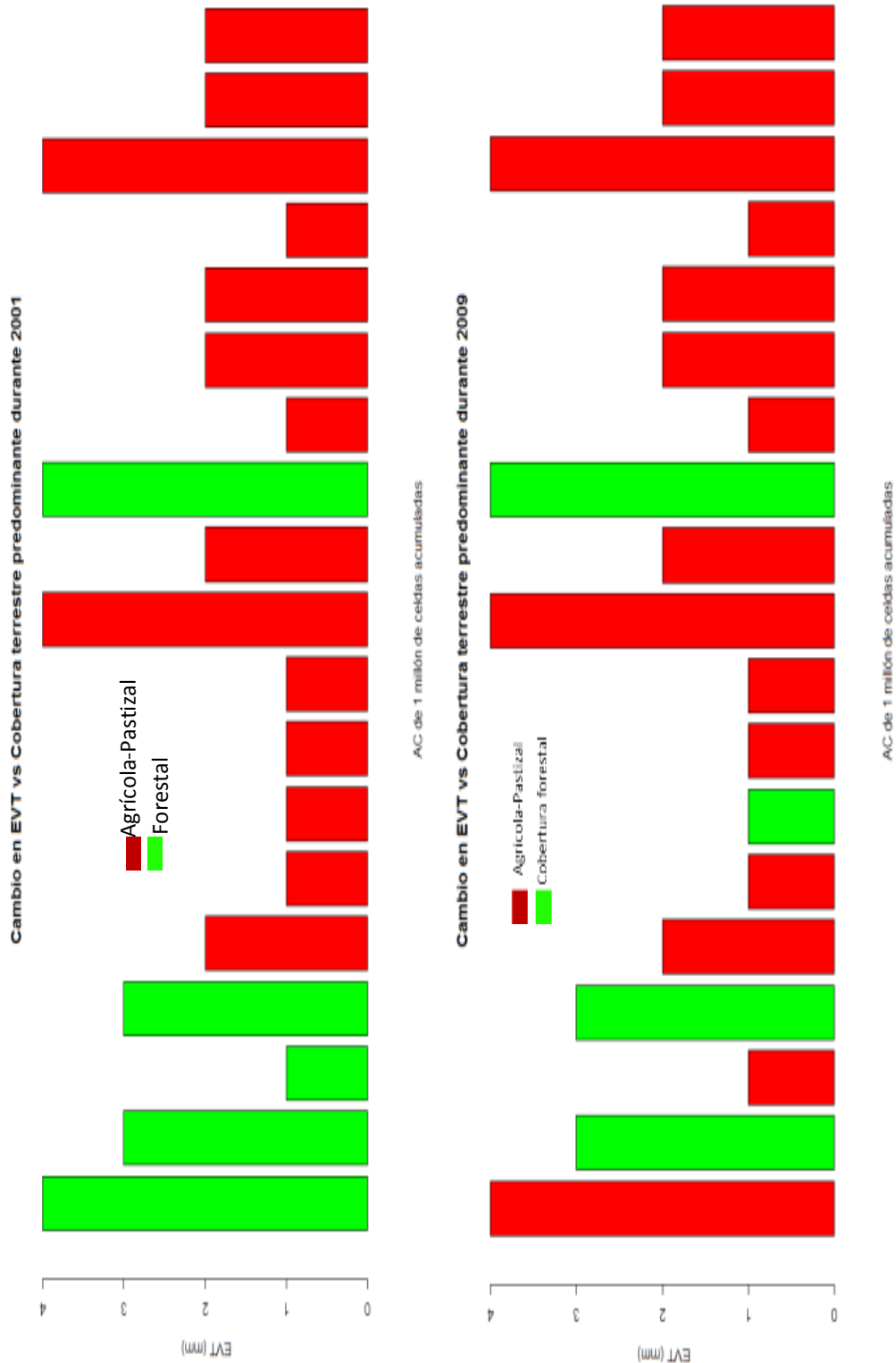


Figura 24. Relación entre la evapotranspiración y el tipo de cobertura terrestre entre 2001 y 2009 en la cuenca Usumacinta, para áreas de captación de 1 millón (izquierda) y 50 mil (derecha) píxeles aproximadamente. Cobertura forestal (verde) y agrícola-pastizal (rojo)

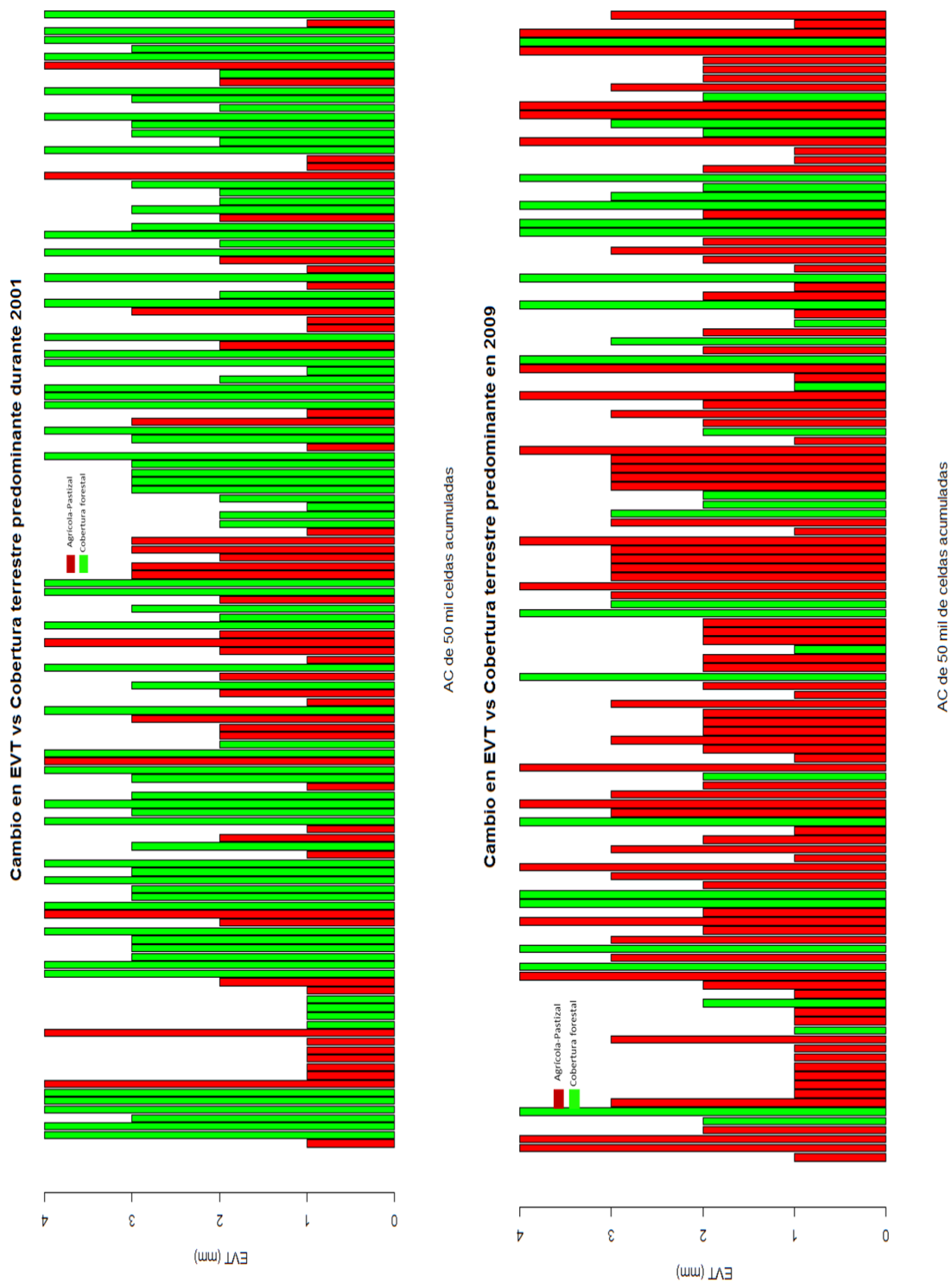


Figura 25. Relación entre la evapotranspiración y el tipo de cobertura terrestre dominante durante 2001 y 2009 en la cuenca Usumacinta, para áreas de captación de 50 mil píxeles. Cobertura forestal (verde) y agrícola-pastizal (rojo)

En la figura 24 se muestran los resultados para áreas de captación (AC) de 1 millón de píxeles en los años 2001 y 2009 respectivamente. En 2001 la cobertura forestal tuvo cuatro (21%) AC con nivel alto y medio alto de evapotranspiración y un AC (5.2%) con nivel bajo, mientras que la cobertura agrícola-pastizal tuvo sólo dos AC (10.5%) con niveles de evapotranspiración alto y 12 AC (63.1%) con nivel bajo y medio bajo. En contraparte, en la gráfica que muestra los resultados del 2009, tres (15.7%) de las cuatro AC donde dominaba la cobertura forestal tuvieron niveles de evapotranspiración alto y medio alto, mientras que la cobertura agrícola-pastizal tuvo dominancia en 15 AC, de las cuáles 12 AC (63.1%) tuvieron evapotranspiración baja y media baja y, sólo tres (15.7%) de ellas manifestaron un nivel alto y medio alto de evapotranspiración.

En cuanto en la figura 25 se muestran las áreas de captación de 50 mil píxeles. En estas gráficas se observa que en el año 2001, 83 AC tenían predominancia de cobertura forestal, de las cuales 64 AC (47.7%) tienen nivel alto y medio alto y 19 AC (14.1%) tienen nivel bajo y medio bajo. En contraste, la cobertura agrícola-pastizal tiene predominancia en 51 AC, de las cuales 14 AC (10.4%) tienen niveles de evapotranspiración alto y medio alto, y a su vez, 37 AC (27.6%) tienen niveles de evapotranspiración bajo y medio bajo. En cambio, durante el 2009 se registraron siete AC donde la cobertura dominante fue nube, por lo que estas áreas de captación fueron eliminadas del conteo. En cuanto a las áreas de captación donde dominaba la cobertura forestal fueron sólo 34 AC, de las cuales 21 áreas de captación (16.5%) tenían nivel medio alto y alto, mientras que las 13 AC (10.2%) restantes tuvieron evapotranspiración baja y media baja. En cuanto a la cobertura agrícola-pastizal tuvo dominancia en 93 AC, de las cuales 41 AC (32.2%) tuvieron evapotranspiración alta y media alta, mientras que 52 AC (40.9%) tuvieron niveles de evapotranspiración media baja y baja.

Al observar las gráficas de la figura 24, los resultados muestran que la cobertura forestal y la cobertura agrícola-pastizal coincidieron en la proporción de AC que tuvieron mayor evapotranspiración y que los volúmenes más bajos de evapotranspiración era emitida principalmente por la cobertura agrícola pastizal. En cambio, durante en 2009 las proporciones cambiaron un poco, el volumen de evapotranspiración de la cobertura forestal descendió en un 5% respecto al 2001 y a su vez, la evapotranspiración de la cobertura agrícola pastizal aumento en un 5%.

Con respecto a los resultados que se muestran en la figura 25 la diferencia entre los años 2001 y 2009 es evidente. Los niveles de evapotranspiración durante 2001 fueron mayores en la cobertura forestal y en el 2009 los mayores niveles de evapotranspiración se obtuvieron de la cobertura agrícola-pastizal. Sin embargo, cabe destacar que la diferencia entre la proporción de volúmenes altos de evapotranspiración de la cobertura forestal durante el 2001 y los niveles altos de evapotranspiración de la cobertura agrícola-pastizal durante el 2009 fue de aproximadamente 15% a favor de la cobertura forestal.

Estos resultados confirman que el cambio de cobertura terrestre, como una única variable dependiente, no tiene mucho impacto en el volumen de evapotranspiración, ya que la disminución de transpiración en las plantas se ve compensada con la evaporación

superficial. Sin embargo, la diferencia del 15%, antes mencionada, podría sugerir que la pérdida de cobertura forestal si disminuye un poco el volumen de evapotranspiración. Ahora bien, el presente estudio no proporciona las bases necesarias para afirmar rotundamente que dicho 15% se deba a la pérdida de bosques. Para que esta afirmación pueda ser confirmada o no, valdría la pena estimar en qué medida influenciaron otros factores como: la humedad del aire, la temperatura, albedo, precipitación, etcétera.

Relación entre el cambio de cobertura terrestre y el almacenamiento de carbono en las superficies forestales.

Estos resultados están basados en el mapa de cambio entre 1986 y 2015. Este mapa se muestra en la figura 25.

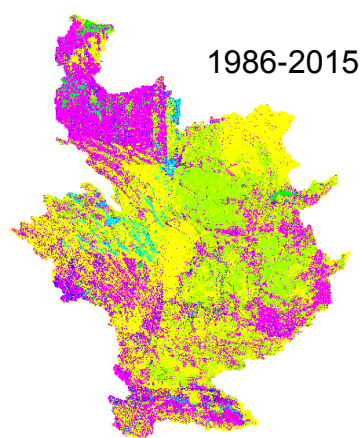


Figura 26. Mapa de cambio de cobertura terrestre entre 1986 y 2015.

Del mapa de la figura 26 se hizo una reclasificación binaria de la cobertura terrestre: forestal y no forestal. De esta nueva reclasificación se obtuvieron los mapas de la figura 26, que representan a la cobertura forestal conservada, perdida y ganada desde 1985.

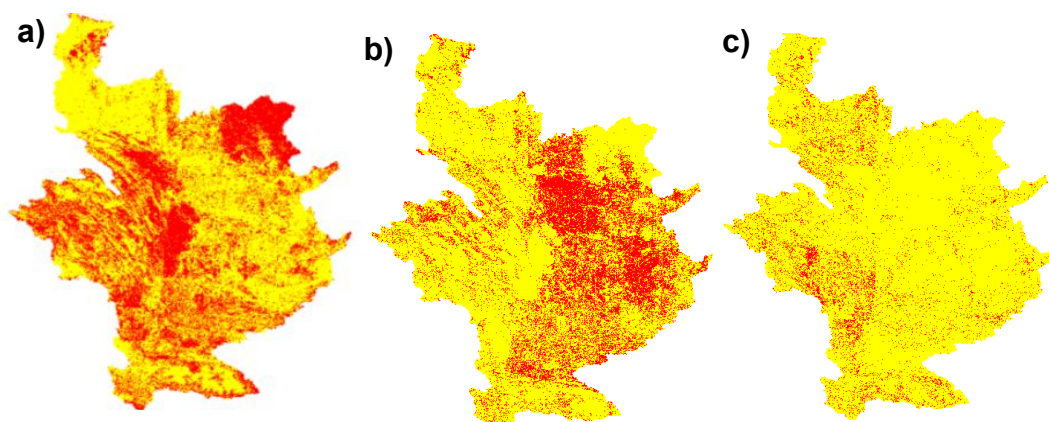


Figura 27. Cobertura forestal desde 1985 hasta 2015: (a) conservada, (b) perdida y (c) ganada

En la figura 27 (a), se presenta la cobertura forestal conservada desde 1985 hasta el 2015. Estas zonas se ubican principalmente en dos grandes macizos: Reserva de la Biosfera Maya en Guatemala y en la Reserva de la Biosfera “Montes azules” en Chiapas, México, aunque también hay otras zonas con cobertura forestal fragmentada en el resto de la cuenca.

En la figura 27(b), se observa la cobertura forestal pérdida desde 1985 hasta 2015. Las zonas de mayor pérdida de cobertura forestal se encuentran en Guatemala, aunque esto no es un fenómeno aislado de este país, en México se puede observar desde 1985 grandes zonas con cobertura agrícola-pastizal, lo que quiere decir que en México los cambios de cobertura ocurrieron antes de 1985. Esto se confirma si se observa las figura 13 donde se visualiza la ubicación geográfica de la división política de la región mexicana de la cuenca Usumacinta y la figura 15 (a), que muestra la cobertura terrestre de 1985, que al integrarlas, se evidencia que Tabasco y Campeche presentan amplias zonas sin cobertura forestal. Incluso, pueden observarse cambios en la parte suroeste de Chiapas. No obstante, en la figura 27 (c), se muestran zonas de ganancia de cobertura forestal que no había en 1985 y si estaba presente en el 2015. Estos sitios de ganancia de cobertura forestal se encuentran dispersos en toda la cuenca, pero existe una pequeña zona de notoria repoblación de la cobertura forestal en la frontera suroeste entre México y Guatemala.

En la tabla 8 se muestra la extensión de cobertura forestal perdida, ganada y conservada, así como su valor en toneladas de carbono perdido, recapturado o conservado en la cobertura forestal, de acuerdo con lo propuesto por Masera y otros (2000) e incluido en esta tesis en el capítulo 1.

Tabla 7. Carbono almacenado perdido, ganado o conservado según el área de cobertura forestal desde 1985 hasta el 2015

Clase	Área (Ha)	Área (%)	tonC
Área pérdida	1972731	38.077126636	-256 707 840
Área ganada	583575	11.2640087151	75 939 540
Área conservada	2624576	50.6588646489	341 531 208

La tabla 7 muestra el valor de pérdida, ganancia o conservación de la cobertura forestal. A partir de dicha tabla se sabe que: desde 1985 al 2015, la cobertura forestal perdida equivale al 38% de la cobertura total en el período de tiempo mencionado. Asimismo, el área ganada de cobertura forestal en el mismo período fue del 11% y el área conservada de cobertura forestal fue del 50% de la cobertura forestal total entre 1985 y 2015.

Con respecto a la captura de carbono en la cuenca Usumacinta, cabe decir que aunque la cobertura forestal de la cuenca es un sumidero muy importante que resguarda 341,531,208

toneladas de carbono en su biomasa, las pérdidas de la cobertura forestal ha sido avasalladora, lo que implica que por consecuencia de la deforestación se han liberado cerca de 256,707,640 toneladas de carbono, y no sólo eso, sino que se ha perdido el potencial para seguir almacenando carbono. Sin embargo, a lo largo del tiempo han crecido algunos nuevos árboles en la cuenca, lo que ha permitido recapturar 75, 939,540 toneladas de carbono. Ahora bien, si estas nuevas poblaciones forestales han coadyuvado con la mitigación de la emisión de CO₂, gracias a que lo depositan en sus tejidos vegetales, aún no es suficiente. La pérdida ha sido mucho mayor que la ganancia, por lo que aún no se ha logrado mitigar o reducir el impacto de la deforestación en la cuenca Usumacinta presentada en las décadas recientes y verificada con esta investigación.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este último capítulo se presentarán las conclusiones más relevantes, algunas recomendaciones al trabajo expuesto y se propondrán algunas líneas de investigación.

Conclusiones

Sin duda, los estudios que involucran el cambio de cobertura terrestre son de gran importancia ya que permiten conocer la magnitud y las tendencias de cambio y conservación del capital natural, así como los bienes y servicios que ofrecen los recursos naturales inmersos en el mismo.

Conclusiones con respecto a la metodología

El uso de imágenes satelitales como fuente de información de la cubierta terrestre es confiable, práctico, útil y económico en tiempo y costos.

La corrección atmosférica es un proceso necesario para reducir el efecto negativo producido en las imágenes como resultado de los procesos de dispersión atmosférica.

El método de clasificación por máxima probabilidad fue eficaz para distinguir los patrones de cambio de uso de suelo en el tiempo para la cuenca de estudio. Por lo que puede ser aplicado para estudiar cuencas en zonas tropicales con condiciones semejantes en cuanto a tamaño y diversidad de condiciones de fauna y flora, fisiográficas y climáticas. Sin embargo, este método puede tener algunas dificultades para distinguir eficientemente la respuesta espectral de algunos tipos de coberturas. En el caso de estudio de esta tesis esto se presentó entre cobertura urbana y la periferia de las nubes.

Conclusiones con respecto a los resultados

Modelo Geoespacial Conceptual

El MGC planteado en el presente trabajo cumplió con la misión de dar un panorama holista de los factores que inciden sobre el espacio geográfico de la cuenca Usumacinta. Uno de los elementos más importantes que el modelo evidenció es que las actividades económicas y los fenómenos sociales que tienen lugar dentro de la cuenca, inciden fuertemente sobre los recursos naturales, principalmente han impulsado la disminución de la cobertura forestal, lo que incide sobre otros fenómenos naturales como la alteración en la captura de carbono y la posible incidencia sobre la evapotranspiración. De esta manera, el MGC fungió como una guía para identificar que fenómenos deberían ser estudiados con ayuda de los SIG, de tal manera que los conocimientos obtenidos asienten las bases para una gestión sustentable y que como consecuencia, pueda mejorar el desarrollo de las actividades sociales y económicas descritas en el modelo, para alcanzar idealmente el bienestar común desde una perspectiva sostenible.

Cambio en la cobertura terrestre

La cuenca Usumacinta ha experimentado constantemente cambios en su cobertura terrestre. De los cinco tipos de coberturas seleccionadas para caracterizar a la cuenca Usumacinta, la cobertura forestal es la que ha sido más reducida con el transcurrir del tiempo. Tal es el caso que a pesar de que se registró cierta repoblación de la cubierta forestal en el 2015, este crecimiento es insuficiente para mitigar el impacto de la deforestación.

La cobertura agrícola-pastizal es el tipo de cobertura que ha tenido un incremento exponencial, principalmente entre 2001 y 2009, aunque en contraste con la cobertura forestal, la cobertura agrícola-pastizal experimento una ligera disminución durante el 2015. La extensión del agua superficial fue mayor durante 1985, cuando se registró la mayor extensión de cobertura forestal. Sin embargo, en el resto de los años evaluados, el área cubierta por agua permaneció más o menos constante.

Las variaciones en la cobertura urbana es inexacta debido a la confusión entre la cobertura urbana y la cobertura nube.

La cobertura suelo desnudo mostró una tendencia negativa desde 1985 hasta el 2009, pero tuvo un incremento en los años recientes, lo que pueden ser explicadas por el arado de la tierra o por las actividades de limpieza después de las cosechas.

Evapotranspiración

A nivel de áreas de captación, las comparaciones realizadas entre 2001 y 2009 demostraron que durante el año 2001 hubo mayor volumen de evapotranspiración que durante 2009, por lo que puede concluirse que existe una tendencia a perder la capacidad de evapotranspiración de la cuenca, con el consecuente aumento de escurrimiento que genera

desequilibrios al sistema hidrológico superficial y riesgos para la población..

Coincidiendo con el punto anterior, a nivel de cuenca, el volumen de agua evapotranspirada fue mayor en el año 2001 que en el 2009, lo que confirma la pérdida de capacidad de evapotranspiración.

Relación entre cambio de evapotranspiración y cambio de cobertura terrestre

A nivel de cuenca, el cambio de cobertura terrestre, como única variable dependiente, no tiene una correlación significativa con el volumen de evapotranspiración. Sin embargo, puede haber otros factores no considerados en este estudio que explican en mayor grado la variabilidad de la evapotranspiración.

A nivel de áreas de captación, tampoco hay evidencia de que los cambios en la cobertura terrestre afecten significativamente al volumen de evapotranspiración. Sin embargo, la diferencia que hay entre la proporción de evapotranspiración en niveles altos de la cobertura forestal y la cobertura agrícola-pastizal sugiere que la cobertura terrestre si tiene injerencia sobre la evapotranspiración. No obstante, esto debe confirmarse con la inclusión de otras variables, como el albedo, la humedad del aire, etcétera.

Relación entre cobertura terrestre y almacenaje de carbono

En la cuenca Usumacinta se ha reducido la cobertura forestal sistemáticamente, transgrediendo el ciclo de carbono, por lo que se ha mermado la capacidad de almacenar bióxido de carbono, en la biomasa y en el suelo de la cuenca. Además, el carbono que ya había sido almacenado en la biomasa de la cobertura forestal se ha perdido en un 38%. Esto implica la liberación de más de 250 millones de toneladas de carbono desde 1985 hasta el 2015.

El área repoblada por la cobertura forestal ha permitido que se recobre casi 76 millones de toneladas de carbono.

Conclusiones generales.

La temporalidad del estudio permitió conocer la riqueza forestal que tenía la cuenca Usumacinta en 1985 y sus cambios y efectos en factores como evapotranspiración y almacenaje de carbono hasta 2015. La cobertura terrestre de la cuenca ha sido seriamente transformada con el transcurso de los años lo que ha alterado fenómenos tan importantes como la capacidad de los bosques para almacenar carbono. Esto es alarmante, porque si bien la cuenca Usumacinta recuperó un poco de su cobertura en la última década, esto no es suficiente como para evitar alteraciones en el ciclo hidrológico o el ciclo del carbono, lo que podría tener consecuencias negativas en la calidad de vida de las personas que habitan en la cuenca y a nivel regional y global, ya que la cuenca Usumacinta es una región importante que coadyuva con la mitigación de la emisión del bióxido de carbono.

Con respecto a la relación de la pérdida de cobertura forestal y la evapotranspiración, aunque ambos factores no estén fuertemente correlacionados, eso no implica que la

transformación de la cobertura terrestre no tenga consecuencias sobre el balance hídrico y el ciclo hidrológico.

Recomendaciones

Una de las limitantes para la adquisición de imágenes satelitales fue el porcentaje de nubosidad, ya que la cuenca Usumacinta se encuentra en una región con alto grado de nubosidad. Este problema puede evitarse si se utilizaran imágenes radar.

Conocer las coberturas reales hacia el pasado es complicado, por lo que se recomienda apoyarse de mapas previos que describan la cobertura del momento en cuestión

La clasificación por máxima probabilidad requiere de polígonos que abarquen sólo el tipo de cobertura que se reclasificará.

Líneas de investigación sugeridas

Evaluar efectos del cambio en la cobertura terrestre en todos los elementos del balance hídrico aplicando imágenes de radar.

Investigar otros factores adicionales al cambio de cobertura terrestre que definen la variabilidad de la evapotranspiración de la cuenca como albedo, humedad del aire, temperatura, precipitación, etcétera.

Evaluar estrategias de gestión ambiental transfronteriza establecidas y/o plantear nuevas en base a los conocimientos adquiridos en esta investigación.

Priorizar zonas de mayor prestación de servicios ambientales de la cuenca Usumacinta para ponderar su conservación

Evaluar la realización de acciones que permitan la repoblación de la cubierta forestal a lo largo y ancho de la cuenca.

Identificar de actores involucrados en los cambios de cobertura terrestre y diseñar estrategias de comunicación y negociación entre ellos.

REFERENCIAS

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M., 2006. *Evapotranspiración del cultivo- Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO.

Álvarez-Icaza, P. L., 2012. Aplicaciones de geomática para la toma de decisiones. *Revista internacional de estadísticas y geografía*, pp. 90-100.

Amatya, D. et al., 2016. Ecosystem evapotranspiration: Callenges in measurements, estimates and modeling. *American Society of Agricultural and Biological engineers*, 59(2), pp. 555- 560.

Amezcu, I. et al., 2007. *Tenosique: análisis económico-ambiental de un proyecto hidroeléctrico en el río Usumacinta*, s.l.: Conservation strategy Fund, Park Waren, ProNatura, Fundación defensores de la naturaleza y Naturalia.

Amezcu, I. et al., 2007. *Tenosique: Análisis económico-ambiental de un proyecto hidroeléctrico en el Río Usumacinta*. s.l.:Conservation Strategy Fund.

Ancari, L. V. (Junio de 2011). Satélites ayudan a la naturaleza. *La teledetección satélital y los sistemas de protección ambiental*. La Paz, Bolivia: Revista de Información, Tecnología y Sociedad.

Ariza, A., 2013. *Descripción y corrección de productos Landsat 8*, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Armitage, D., 2005. Adaptive capacity and community-based natural resource management. *Environmental management*, 35(6), pp. 703-715.

Banco Mundial, 2016. *Emisiones de CO2 (toneladas métricas per cápita)*. [Online] Available at: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC>

Baxendale, C., 2010. Geografía, organización del territorio y sistemas de información geográfica. In: *Geografía y sistemas de información geográfica. Aspectos conceptuales y aplicaciones*. Luján: GESIG-UNLu, pp. 37-49.

Begon, M., Townsend, C. & Harper, J., 2006. *Ecology. From individual to ecosystems*. England: Blackwell publishing.

Cabrera, J. & Cuc, P., 2002. *Diagnóstico socialmente de la cuenca del río Usumacinta*, s.l.: Fundación Kukulcan, Fundación Del Servicio Exterior para la Paz y el Desarrollo Democrático, Universidad de Costa Rica y Universidad Nacional de Costa Rica.

Camacho, V. V. & Ruíz, A. L., 2011. *Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos*. Mazatlán, México: Revista Biociencias.

Carabias, J., 1988. Deterioro ambiental en México. *CIENCIAS*, pp. 13-19.

- Céspedes, S. E. F. & Moreno, E. S., 2010. Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en las entidades federativas de México. *Investigación ambiental*, pp. 5-13.
- Cheng, S., 2008. From community-based management to transboundary watershed governance. *Development*, Volume 51, pp. 83-88.
- Chuvieco, E., 1995. *Fundamentos de teledetección espacial*. Segunda edición ed. Madrid: Ediciones Rialp S.A..
- CONABIO, 2009. *Capital natural de México: Estado de conservación y tendencias de cambio*. México: CONABIO-SEMARNAT.
- CONAGUA, 2014. *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta*, s.l.: CONAGUA.
- CONANP, 2015. *Programa de manejo del área de protección de flora y fauna Cañón del Usumacinta*, México D.F.: SEMARNAT.
- Conde, C., 2006. *México y el cambio climático global*. México: UNAM.
- Cotler, H., 2010. *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. México: SEMARNAT/INE.
- Cotler, H., 2010. Perspectivas sobre las cuencas hidrográficas de México: Introducción. In: *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. Ciudad de México: INE, pp. 4 -21.
- Cotler, H. Á. et al., 2013. *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. México: SEMARNAT y SECADESU.
- Cuevas, M. L., Garrido, A., Pérez, J. L. D. & González, I. D., 2010. Estado actual de la vegetación en las cuencas de México. In: *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. México: INECC, pp. 50-58.
- Custodio E., Llamas M.R. y Samper J. 1997. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Instituto Tecnológico Geominero de España. España.
- de Jong, B., Masera, O. & Hernández, T. T., 2004. Opciones de captura de carbono en el sector forestal. In: *Cambio Climático: Una visión desde México*. México: SEMARNAT E INE, pp. 369-380.
- Di Gregorio, A. & Jansen, L., 2005. *Sistemas de Clasificación de la cobertura de la Tierra*. Roma: FAO, UNEP, Cooperaciones italiana.
- Dorado, A. N., 2010. *¿Que es la biodiversidad?*. Madrid: FEADER, Fundación Biodiversidad y el gobierno de España.
- FAO, 2005. *Sistema de clasificación de la cobertura de la tierra*. Roma: FAO, UNEP, Cooperazione italiana.

FAO, 2007. *La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas*. ROMA: FAO.

FAO, 2010. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Informe principal*, Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO, 2017. *Las evaluaciones de los recursos forestales mundiales*. [Online] Available at: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/background/es/>

FAO, 2017. *Portal de suelos de la FAO*. [Online] Available at: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-biodiversity/es/> [Accessed 6 02 2017].

Flores, M. M., Aguirre, A. V., Flores, M. H. & Guardado, X. G., 2010. El impacto que produce el sector turismo en los manglares de las costas mexicanas. *Contacts*, pp. 33-38.

García, A. G. & Kauffer, E. M., 2011. Las cuencas compartidas entre México, Guatemala y Belice: Un acercamiento a su delimitación y problemática general. *Frontera norte*, Volume 23, p. 131.161.

García, S. F. P. & Otero, J. D. B., 2005. Estimación de la evapotranspiración real en la cuenca superior del río lebrija (Tesis de ingeniería). In: E. d. I. Civil, ed. Bucaramanga: Universidad Industrial Santander.

Garrido, A., Pérez, J. L. D. & Enríquez, C. G., 2010. Delimitación de las zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México. In: *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y perspectiva*. México: SEMARNAT E INE, pp. 14-17.

Global Environment Facility, 2016. *About us*. [Online] Available at: <https://www.thegef.org/about-us>

Gomarasca, M., 2009. *Basics or geomatics*. Italy: Springer.

González-Iturbe, J. A. A., 2004. Introducción a la percepción remota. In: F. Z. Bautista, H. G. Delfín, J. L. P. Palacio & M. d. C. C. Delgado, eds. *Técnicas de muestro para manejadores de recursos naturales*. México: UNAM, UAY, CONACYT, INE, pp. 455-482.

González, R., 2002. Joint learning with GIS: multi-actor resource management. *Agricultural systems*, pp. 99-111.

Holling, C. S. et al., 1978. *Adaptive environmental assessment and management*. s.l.:John Wiley & Sons.

INEGI, 2016. *Censos y conteos de población vivienda*. [Online] Available at: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2000/default.html>

IPCC, 2001. *Tercer Informe de evaluación. Cambio climático 2001: Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Suiza: IPCC.

IPCC, 2017. *¿Que es el IPCC?*. [Online] Available at: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml

Jaramillo, V., 2004. El ciclo global del carbono. In: *Cambio climático: una visión desde Méxco*. México: SEMARNAT, pp. 77-87.

Kauffer, E. M., 2005. El consejo de cuenca de los ríos Usumacinta y Grijalva: los retos para concretar la participación y la perspectiva de cuencas. In: *Problemas socioambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México*. México: IMTA, IRD, SEMARNAT, CONACYT, pp. 196-220.

Kellert, S., Mehta, J., Ebbin, S. & Lichtenfeld, L., 2000. Community natural resource management: Promise, rhetoric and reality. *Society and natural resources*, Volume 13, pp. 705-715.

Kolb, M. & Galicia, L., 2011. *Patrones y procesos regionales de deforestación y regeneración en la cuenca Grijalva-Usumacinta*. s.l., REDUM.

Lambin, E. F., Geist, H. J. & Lepers, E., 2003. Dynamics land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review Environment Resource*, Volume 28, pp. 205-241.

Levi, S., 2006. Geografía humana y geomática. *Boletín goiano de geografía*, 26(1), pp. 12-29.

Lira, J., 1995. *La percepción remota. Nuestros ojos desde el espacio*. México: Fondo de Cultura Económica.

López, I. A. et al., 2006. *Ecología*. México: Umbral.

March, I. M. & Castro, M., 2010. La cuenca del río Usumacinta: Perfil y perspectivas para su conservación y desarrollo sustentable. In: *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. México: INECC, pp. 193-197.

Margerum, R. D., 2016. *Integrated watershed managment: comparing selected experiences in the U.S. and Australia*. [Online] Available at: http://www.ucowr.com/files/Achieved_Journal_Issues/V100_A6Towards%20More%20Effective%20Integrated%20Watershed%20Management%20in%20Australia.pdf

Marland, G. et al., 2003. The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy. *Climate policy*, pp. 149-157.

Masera, O., 1995. Carbon mitigation scenarios for mexican forest: Methodological considerations and results. *Interciencia*, pp. 388-395.

Masera, O., de Jong, B. & Ricalde, I., 2000. *La oficina mexicana para la mitigación de gases de efecto invernadero*, s.l.: Instituto Nacional de Ecología. UNAM y ECOSUR

Mendoza, M., Bocco, G., López, E. G. & Bravo, M., 2002. Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso de suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, pp. 92-117.

Millenium Ecosystem Assesment, 2005. *Ecosystem and human well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.

Montes, C. & Sala, O., 2007. La evaluación de los ecosistemas del Milenio .Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. *Ecosistemas*, Septiembre, 16(3), pp. 137-147.

Mo, W., Wang, Y., Zhang, Y. & Zhuang, D., 2017. Impacts of road network expansion on landscape ecological risk n a megacity, China: A case study of Beijing. *Science of the total environment*, pp. 1000-1011.

Mu, Q., Heinssch, F. A., Zhao, M. & Running, S., 2007. Development of a global evapotranspiration algorith based on MODIS and global meteorology data. *Remote sensing of environment*, pp. 519-536.

NASA, 2016. *Landsat then and now*. [Online] Available at: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>

National Academic of Science, 1999. *New Strategies for Americas Watersheds*. Washington D.C.: Naional Academy Press.

National Academy of Science, 1999. *New strategies for America's Watershed*. Washington D.C.: National Academy Press.

National Research Council, 2004. Adaptative management theories, frameworks and practices. In: *Adaptive management for water resources project planning*. Washington D.C.: The national academies press, pp. 19-30.

NTSG, n.d. *MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)*. [Online] Available at: <http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16> [Accessed 4 03 2017].

O'Keefe, T. C., Elliot, S. R. & Naiman, R. J., 2017. *Introduction to watershed ecology*. [Online] Available at: <https://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/watershedecology.pdf> [Accessed 2 02 2017].

Olaya, V., 2011. *Sistemas de Información Geográfica*. España: s.n.

ONU, 2016. *Declaración de Rio sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. [Online] Available at: <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/riodeclaration.htm>

Ordoñez, J. A. B. & Masera, O., 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, pp. 3-12.

- Ortiz, M. A. P., 2010. Clasificación ecogeográfica de cuencas hidrográficas: El caso de México. In: *Cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. México: SEMARNAT/INE, pp. 25-27.
- Pardos, J. A., 2010. *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. s.l.:Inia.
- Paruelo, J., Guerschman, J. & Verón, S., 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso de suelo. *Ciencia hpy*, 15(87), pp. 14-24.
- Peel, M., McMahon, T. & Finlayson, B., 2010. Vegetation impact on mean annual evapotranspiration at a global catchment scales. *Water resources research*, Volume 46, pp. 1-16.
- Piedra, J.A., 2005. *Aplicación de los sistemas neurodifusos a la interpretación automática de imágenes de satélite*. (Tesis doctoral). Universidad de Almería. Almería, España.
- Pillet, F. C., 2004. *La geografía y las distintas acepciones del espacio geográfico*, Alicante: Anales de la universidad de Alicante e instituto universitario de geografía.
- Postel, S. & Thompson, B., 2005. Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Natural Resources Forum*, pp. 98-108.
- Ramakrishna, B., 1997. *Estrategas de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: Conceptos y experiencias*. Costa Rica: IICA/ BMZ/gtz.
- Ramírez, L. E. S., 2011. *Actualización de las avenidas de diseño de las presas del río Grijalva*. México D.F.: s.n.
- Rodas, I. N., 2010. El estado, las instituciones y los frentes poblacionales en el noroeste guatemalteco: El caso de los colonos del Usumacinta. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 7(2), pp. 137-154.
- Rodas, M. I. N., 2010. Colonización, cacería y territorio en el Usumacinta medio, Guatemala. In: *Uso y manejo de fauna silvestre en el norte de Mesoamérica*. Xalapa, VERACRUZ: Secretaría de educación de veracruz, pp. 315-240.
- Rodríguez, P., 2001. Biodiversidad en el corredor biológico mesoamericano-México: Diversidad de especies y ecosistemas. In: *Importancia del capital ecológico de la región del corredor biológico mesoamericano-México: evaluación de la biodiversidad, ciclo hidrológico y dinámica de la cobertura forestal*. México: CONABIO, pp. 17-36.
- Rodríguez, Y. & Mohar, A., 2008. Contexto poblacional y de ocupación del espacio del espacio en el corredor biológico mesoamericano-México. In: *Importancia del capital ecológico de la región del corredor biológico mesoamericano-México: evaluación de la biodiversidad, ciclo hidrológico y dinámica de la cobertura forestal*. México: CONABIO, pp. 11-16.

Rosete, F. & Bocco, G., 2003. Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta ecológica*, pp. 43-54.

Rzedowski, J., 2006. *Vegetación de México*. Ciudad de México: CONABIO.

Sánchez-Díaz, M. & Agurreolea, J., 2013. Transpiración y control estomacal. In: *Fundamento de fisiología vegetal*. España: McGRAW-Hill, pp. 45-70.

Schoonover, J. & Crim, J., 2015. An introduction to soil concepts and the role of soils in watershed management. *Journal of contemporary water research and education*, p. 21.47.

Sepúlveda, C., 1958. Historia y problemas de los límites de México: II. La frontera sur. *Historia mexicana*, 2(8), pp. 145-174.

Soto, J. J. C., 2015. El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable. *Paradigma económico*, Issue 1, pp. 127-149.

Tapia-Silva, F. O., 2013. Análisis espacial, hacia una utilización mejorada de la información medida en campo y por satélites, para apoyar la toma de decisiones en materia hídrica y ambiental. *Tecnología y ciencias del agua*, IV(1), pp. 149-166.

Tapia, F. O. S., 2014. Avances de la geomática para la resolución de la problemática del agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), pp. 131-148.

Tapia, F. O. S., Contreras, A. I. S. & Rosales, E. A., 2015. *Hydrological characterization of the Usumasinta river basin towards the preservation of environmental services*. Berlín, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-7/W3, pp. 1505-1509.

Tarbut, E. & Lutgens, F., 2005. *Ciencias de la tierra*. España: Prentice hall.

Vishnudas, S., Savenije, H. & Van Der Zaag, P., 2005. *A conceptual framework for sustainable watershed management*. Germany and Poland, s.n., pp. 2-13.

Wagner-Lotkowska & Magnuszewski, A., 2004. Basic concepts and definition. In: *Integrated watershed management. Ecohydrology and phytotechnology. Manual*. s.l.:UNEP; UNESCO; IHP, p. 30.

Winter, T., Harvey, J., Franke, L. & Alley, W., 1998. *Ground water and surface water. A single resource*. Denver, Colorado: U.S. Government printing office.

Yang, H. et al., 2015. Ecosystem evapotranspiration as a response to climate and vegetation coverage change in northwest Yunnan, China. *Plos*, pp. 1-17.

Yao, Y. et al., 2014. Impacts of deforestation and climate variability on terrestrial evapotranspiration in subarctic China. *Forests*, pp. 2542-2560.

Zhang, L., Walker, G. & Fleming, M., 2001. *Surface water balance for recharge estimation*. Australia: CSIRO.

Zhou, G. et al., 2008. Estimating forest ecosystem evapotranspiration at multiple temporal scales with a dimension analysis approach. *Journal of the american water resources association*, 44(1), pp. 208-222.

Bone, C. & Dragicevic, S., 2009. Evaluating spatio-temporal complexities of forest management: An Integrated agent-based modeling and GIS approach. *Environmental Model Assessment*, Volumen 14, pp. 481-496.

Chuvieco, E. S., 2008. *Teledetección ambiental*. Tercera edición ed. España: Ariel.

Hirosawa, Y., Marsh, S. & Kliman, D., 1996. Application of standardized principal component analysis to land cover characteraton using multitemporal AVHRR data. *Remote Sensor environment*, Volumen 58, pp. 267-281.

INEGI, 2001. *Portal de geoinformación*. [En línea] Available at: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> [Último acceso: 25 05 2016].

Kantakumar, L. & Neelamsetti, P., 2015. Multi-temporal land use classification using hybrid approach. *The egyptian journal of remote sensing and space sciences*, Volumen 18, pp. 289-295.

Lorenz, S., Kasang, D. & Lohmann, G., 2007. Water and climate change. En: J. Lozán, y otros edits. *Global change: Enough water for all?.* Hamburg: Warnsignal Klima, pp. 157-162.

Paz, F. y otros, 2012. *Estudio de factibilidad para el mecanismo REDD+ en Chiapas.* , Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: Conervation internacional, Kibeltik, AMBIO, Programa Mexicano del Carbono.

Tapia-Silva, F. O., 2016. *Modelado Geoespacial Conceptual aplicado a definición del potencial de captación de agua de lluvia en una megalopolis en crisis*. Ciudad de México, Memorias. Primer Congreso Nacional de Ciencias Geoespaciales IEEE-CNCG1.

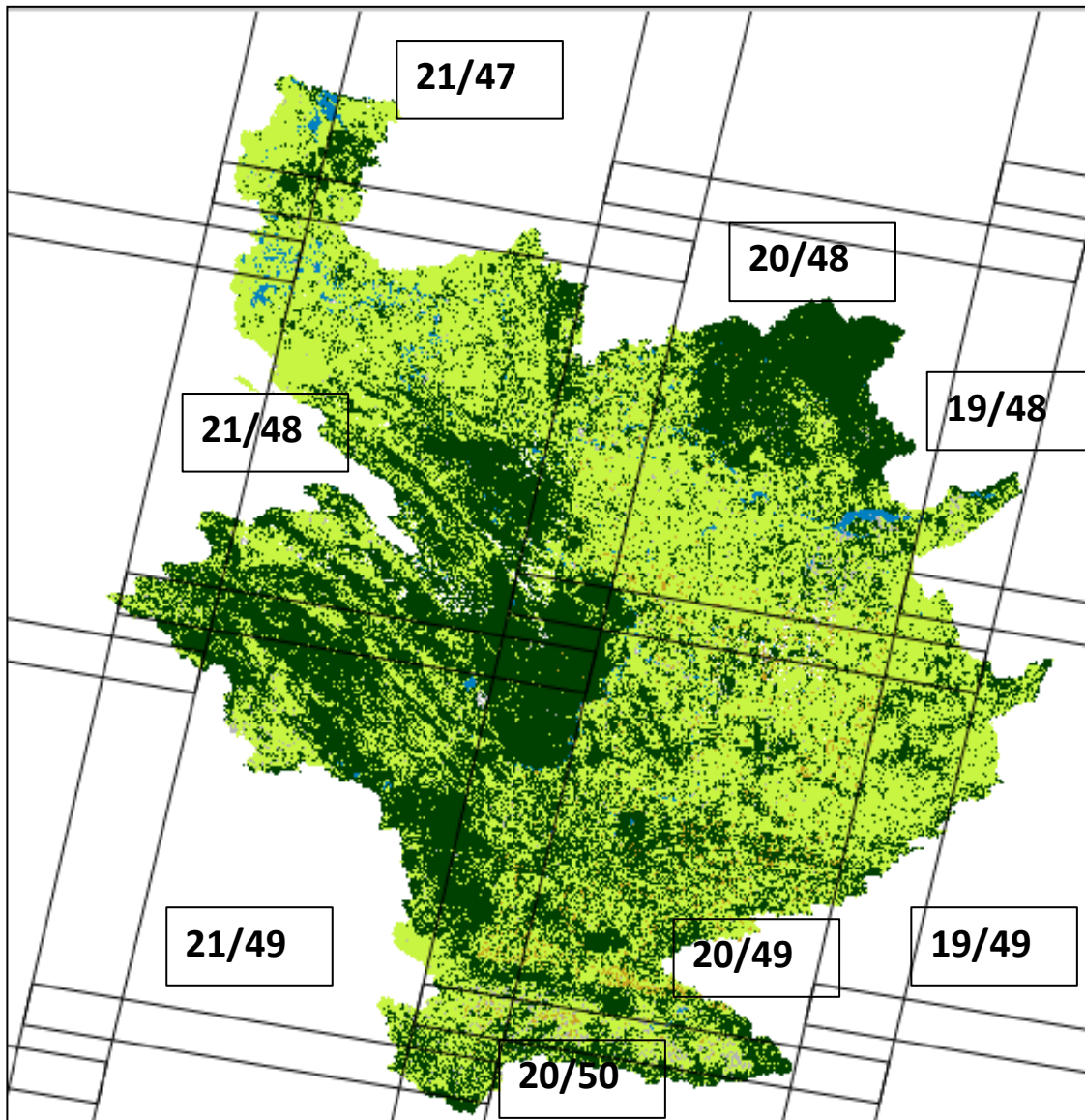
Yoshino, K., Prasetyo, L. B. & Prasetyo, L. B., 2014. Characterizing the dynamics change of vegetation cover on tropical foreslands using 250 m multitemporal MODIS EVI. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, Volumen 26, pp. 132-144.

Sobrino, J., Raissouni N., Kerr, Y., Olioso, A., López-García, M., Belaid, A., . . . Dempere, L. (2000). *Teledetección*. España: Universitat de València.

TAPIA-SILVA, F.O., MORA, F., and NUÑEZ, J.M. Characterization of Tropical River Basins in Mexico and Central America by Remote Sensing and Hydrological Spatial Analysis. Proceedings 32nd International Symposium on Remote Sensing of Environment, San José, Costa Rica,

ANEXO 1

A continuación se presentan los path/row utilizados para unir las imágenes que integran a la cuenca Usumacinta



ANEXO 2

A continuación se muestran los resultados de la matriz de confusión, que muestran los porcentajes de los errores de comisión y omisión, así como el valor del coeficiente kappa. Las clases son las siguientes: 1= Forestal, 2= Zona inundada, 3= Nube, 4= Uso urbano, 5= Agrícola-Pastizal y 6= Suelo desnudo

AÑO 1986

- Path/Row: 21/47

	cat#	1	2	4	5	Row Sum	
M	1	29	0	0	0	29	
A	2	1	29	0	0	30	
P	4	0	0	24	1	25	
2	5	0	1	6	29	36	
Col Sum			30	30	30	30	120

- Path/Row: 21/48

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum	
M	1	30	0	0	0	0	30	
A	2	0	30	0	0	0	30	
P	3	0	0	29	1	0	30	
2	4	0	0	1	29	4	34	
	5	0	0	0	0	26	26	
Col Sum			30	30	30	30	30	150

- Path/Row: 21/49

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum	
M	1	28	0	0	0	0	28	
A	2	1	30	0	0	0	31	
P	3	0	0	30	0	0	30	
2	4	0	0	1	24	1	26	
	5	1	0	0	4	28	33	
Col Sum			30	30	31	28	29	148

- Path/Row: 20/48

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum	
M	1	29	0	0	0	1	30	
A	2	0	30	0	0	0	30	
P	3	0	0	30	0	0	30	
2	4	0	0	0	27	6	33	
	5	1	0	0	3	23	27	
Col Sum			30	30	30	30	30	150

-
- Path/Row: 20/49

	cat#	1	2	4	5	6	Row Sum
M	1	29	1	0	0	0	30
A	2	0	28	2	0	0	30
P	4	0	0	20	4	1	25
2	5	1	0	3	26	0	30
	6	0	1	5	0	29	35
Col Sum			30	30	30	30	150

-
- Path/Row: 20/50

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum
M	1	30	0	0	0	2	0	32
A	2	0	30	0	0	0	0	30
P	3	0	0	16	0	0	1	17
2	4	0	0	9	22	0	0	31
	5	0	0	5	6	28	13	52
	6	0	0	0	1	0	16	17
Col Sum			30	30	30	29	30	179

-
- Path/Row: 19/48

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	30	1	0	1	1	33
A	2	0	29	0	0	0	29
P	3	0	0	29	0	0	29
2	4	0	0	1	29	0	30
	5	0	0	0	0	29	29
Col Sum			30	30	30	30	150

-
-
- Path/Row: 19/49

	cat#	1	2	4	5	Row Sum
M	1	29	16	0	1	46
A	2	0	14	0	0	14
P	4	0	0	30	0	30
2	5	1	0	0	29	30
Col Sum			30	30	30	120

AÑO 1995

- Path/Row: 21/47

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	28	0	0	0	0	28
A	2	0	29	0	0	0	29
P	3	0	0	30	4	0	34
2	4	0	0	0	21	2	23
	5	2	1	0	5	28	36
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 21/48

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	30	0	0	0	0	30
A	2	0	27	0	0	0	27
P	3	0	0	30	0	0	30
2	4	0	0	0	26	6	32
	5	0	3	0	4	24	31
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 21/49

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	28	0	0	0	0	28
A	2	1	30	0	0	0	31
P	3	0	0	30	2	1	33
2	4	0	0	0	26	1	27
	5	2	0	0	2	27	31
Col Sum			31	30	30	30	29 150

- Path/Row: 20/48

	cat#	1	2	4	5	Row Sum
M	1	30	0	0	0	30
A	2	0	30	0	0	30
P	4	0	0	28	1	29
2	5	0	0	2	29	31
Col Sum			30	30	30	120

- Path/Row: 20/49

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum
M	1	26	1	0	0	0	0	27
A	2	0	29	0	0	0	0	29
P	3	0	0	30	1	0	0	31
2	4	0	0	0	0	3	3	6
	5	4	0	0	29	27	8	68
	6	0	0	0	0	0	19	19
Col Sum			30	30	30	30	30	180

- Path/Row: 20/50

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum
M	1	30	0	0	0	7	0	37
A	2	0	30	0	0	0	0	30
P	3	0	0	30	0	0	0	30
2	4	0	0	0	28	1	2	31
	5	0	0	0	1	22	8	31
	6	0	0	0	1	0	20	21
Col Sum			30	30	30	30	30	180

- Path/Row: 19/48

	cat#	1	2	4	5	6	Row Sum
M	1	29	0	2	0	0	31
A	2	0	30	0	0	1	31
P	4	0	0	17	1	5	23
2	5	1	0	0	29	1	31
	6	0	0	11	0	23	34
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 19/49

	cat#	1	3	4	5	Row Sum
M	1	30	0	0	1	31
A	3	0	25	1	0	26
P	4	0	5	29	4	38
2	5	0	0	0	25	25
Col Sum			30	30	30	120

AÑO 2001

- Path/Row: 21/47

	cat#	1	2	4	5	Row Sum	
M	1	29	0	0	0	29	
A	2	0	30	0	0	30	
P	4	0	0	20	0	20	
2	5	1	0	10	30	41	
Col Sum			30	30	30	30	120

- Path/Row: 21/48

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum	
M	1	25	0	0	0	0	25	
A	2	0	30	0	0	0	30	
P	3	0	0	0	0	0	0	
2	4	0	0	30	23	0	53	
	5	5	0	0	7	30	42	
Col Sum			30	30	30	30	30	150

- Path/Row: 21/49

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum	
M	1	30	1	0	0	0	31	
A	2	0	29	0	0	0	29	
P	3	0	0	30	0	0	30	
2	4	0	0	0	28	1	29	
	5	0	0	0	2	29	31	
Col Sum			30	30	30	30	30	150

- Path/Row: 20/48

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum	
M	1	26	1	0	0	1	0	28	
A	2	0	28	0	0	2	0	30	
P	3	0	0	30	11	4	0	45	
2	4	0	0	0	13	0	1	14	
	5	4	0	0	6	23	0	33	
	6	0	1	0	0	0	29	30	
Col Sum			30	30	30	30	30	30	180

- Path/Row: 20/49

	cat#	0	1	2	3	4	5	6	Row Sum	
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
A	1	0	30	0	0	0	1	0	31	
P	2	0	0	30	0	0	0	0	30	
2	3	0	0	0	29	0	0	0	29	
	4	1	0	0	1	25	0	10	37	
	5	0	0	0	0	1	29	0	30	
	6	0	0	0	0	3	0	20	23	
Col Sum			1	30	30	30	29	30	30	180

- Path/Row: 20/50

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum	
M	1	30	0	0	0	3	13	46	
A	2	0	30	0	0	0	0	30	
P	3	0	0	28	0	0	0	28	
2	4	0	0	2	30	1	13	46	
	5	0	0	0	0	25	2	27	
	6	0	0	0	0	1	0	1	
Col Sum			30	30	30	30	30	28	178

- Path/Row: 19/48

	cat#	1	2	4	5	Row Sum	
M	1	29	0	0	0	29	
A	2	0	30	0	0	30	
P	4	0	0	26	1	27	
2	5	1	0	4	29	34	
Col Sum			30	30	30	30	120

- Path/Row: 19/49

	cat#	1	3	4	5	Row Sum	
M	1	29	0	0	2	31	
A	3	0	18	0	0	18	
P	4	0	12	27	0	39	
2	5	1	0	3	28	32	
Col Sum			30	30	30	30	120

AÑO 2009

- Path/Row: 21/47

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	30	0	0	0	0	30
A	2	0	30	0	0	0	30
P	3	0	0	20	4	0	24
2	4	0	0	9	14	1	24
	5	0	0	1	12	29	42
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 21/48

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	22	0	0	0	0	22
A	2	0	30	0	0	0	30
P	3	0	0	22	10	0	32
2	4	0	0	8	20	1	29
	5	8	0	0	0	29	37
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 21/49

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	28	0	0	0	0	28
A	2	0	30	0	0	0	30
P	3	0	0	22	12	0	34
2	4	0	0	8	15	2	25
	5	2	0	0	3	28	33
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 20/48

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	29	0	0	0	1	30
A	2	0	30	0	0	0	30
P	3	0	0	19	7	0	26
2	4	0	0	11	22	0	33
	5	1	0	0	1	29	31
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 20/49

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum
M	1	27	1	0	0	0	0	28
A	2	1	26	0	0	0	0	27
P	3	0	0	19	0	1	4	24
2	4	0	0	11	8	0	6	25
	5	2	3	0	18	28	0	51
	6	0	0	0	4	1	20	25
Col Sum			30	30	30	30	30	180

- Path/Row: 20/50

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum
M	1	30	0	0	0	0	0	30
A	2	0	28	0	0	0	0	28
P	3	0	0	16	0	0	6	22
2	4	0	2	14	28	1	21	66
	5	0	0	0	2	29	0	31
	6	0	0	0	0	0	3	3
Col Sum			30	30	30	30	30	180

- Path/Row: 19/48

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	19	0	0	0	0	19
A	2	0	30	0	0	0	30
P	3	0	0	30	2	0	32
2	4	0	0	0	12	0	12
	5	11	0	0	16	30	57
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 19/49

	cat#	1	3	4	5	Row Sum
M	1	30	0	1	0	31
A	3	0	0	0	0	0
P	4	0	30	25	5	60
2	5	0	0	4	25	29
Col Sum			30	30	30	120

AÑO 2015

- Path/Row: 21/47

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum
M	1	29	2	0	0	2	0	33
A	2	0	28	0	0	0	0	28
P	3	0	0	3	1	0	0	4
2	4	0	0	23	17	0	14	54
	5	1	0	4	12	28	2	47
	6	0	0	0	0	0	14	14
Col Sum			30	30	30	30	30	180

- Path/Row: 21/48

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	29	0	0	0	0	29
A	2	0	24	0	0	0	24
P	3	0	0	30	10	0	40
2	4	0	0	0	19	0	19
	5	1	6	0	1	30	38
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 21/49

	cat#	1	2	3	4	5	Row Sum
M	1	28	0	0	0	0	28
A	2	0	29	0	0	0	29
P	3	0	0	30	0	0	30
2	4	0	0	0	29	1	30
	5	2	1	0	1	29	33
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 20/48

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum
M	1	29	0	0	0	0	0	29
A	2	0	30	0	0	0	0	30
P	3	0	0	0	0	0	0	0
2	4	0	0	30	30	1	17	78
	5	1	0	0	0	28	0	29
	6	0	0	0	0	1	13	14
Col Sum			30	30	30	30	30	180

- Path/Row: 20/49

	cat#	1	2	3	4	5	6	Row Sum
M	1	29	0	0	0	0	0	29
A	2	0	26	0	0	0	0	26
P	3	0	0	28	0	0	0	28
2	4	0	0	2	15	0	11	28
	5	1	0	0	0	28	0	29
	6	0	4	0	15	2	19	40
Col Sum			30	30	30	30	30	180

- Path/Row: 20/50

	cat#	1	2	4	5	6	Row Sum
M	1	27	0	0	2	0	29
A	2	0	28	0	0	0	28
P	4	0	2	27	3	19	51
2	5	3	0	3	25	11	42
	6	0	0	0	0	0	0
Col Sum			30	30	30	30	150

- Path/Row: 19/48

	cat#	1	2	4	5	Row Sum
M	1	30	1	0	0	31
A	2	0	29	0	0	29
P	4	0	0	15	0	15
2	5	0	0	15	30	45
Col Sum			30	30	30	120

- Path/Row: 19/49

	cat#	1	4	5	Row Sum
M	1	29	0	0	29
A	4	0	29	0	29
P	5	1	1	31	33
Col Sum			30	30	91

ANEXO 3

Este anexo muestra la extensión (Ha) de los cambios de cobertura obtenidos de los mapas de la figura 17. Las abreviaciones usadas en este anexo son: F= forestal, Z.I. =Zona inundada, N=nube, U= urbano, A-P= agrícola-pastizal y S.D= suelo desnudo

Cambio 1985-1995		Cambio 1985-1995					
Cambio	Extensión (Ha)		Cobertura	Ha conservada	Ha perdida	Ha ganada	total
F-F	3629196		Forestal	3629196	982568	741116	4370312
F-Z.I	8477		Zona inundada	59116	107529	23234	82350
F-U	50645		Uso urbano	16979	162095	191859	208838
F-A.P	911776		Agrícola-Pastizal	1401976	2132006	1090551	2492527
F-S.D.	11670		Suelo desnudo	6957	14639	55679	62636
Z.I.-F	14713						
Z.I.-Z.I	59116						
Z.I.-U	3101				Cobertura ganada (Ha)		
Z.I.-A.P.	29918		Forestal	Zona inundada	Uso urbano	Agrícola-Pastizal	Suelo Desnudo
Z.I.-S.D.	681		14713	8477	50645	911776	11670
N-F	131483		131483	2965	3101	29918	681
N-S.D.	2965		35768	1896	5813	36551	4861
N-U	5813		557615	9377	131226	100797	6655
N-A.P.	36551		1537	519	1074	11509	31812
N-S.D.	4861	Tota l	741116	23234	191859	1090551	55679
U-F	35768						
U-Z.I.	1896						
U-U-	16979						
U-A.P.	100797						
U-S.D.	6655						
A.P.-F	557615						
A.P.-Z.I.	9377						
A.P.-U	131226						
A.P.-A.P.	1401976						
A.P.-S.D.	31812						
S.D.-F	1537						
S.D.-Z.I.	519						

S.D.-U	1074						
S.D.-A.P.	11509						
S.D.-S.D.	6957						

Cambio 1985-2001		Cambio 1985-2001					
Cambio	Extensión		Cobertura	Ha conservada	Ha perdida	Ha ganada	total
F-F	3103071		Forestal	3103071	1290679	765763	3868834
F-Z.I	16673		Zona inundada	58968	104810	39858	98826
F-U	36853		Uso urbano	11865	160405	83365	95230
F-A.P	1231830		Agrícola-Pastizal	1454021	2129186	1432873	2886894
F-S.D.	5323		Suelo desnudo	1522	19553	40305	41827
Z.I.-F	12228						
Z.I.-Z.I	58968						
Z.I.-U	738	área ganada (Ha)					
Z.I.-A.P.	31803		Forestal	Zona inundada	Uso urbano	Agrícola-Pastizal	Suelo desnudo
Z.I.-S.D.	1073		12228	16673	36853	1231830	5323
N-F	122192		122192	2342	738	31803	1073
N-S.D.	2342		40357	1982	1750	55555	546
N-U	1750		585068	18404	43068	101463	4738
N-A.P.	55555		5918	457	956	12222	28625
N-S.D.	546	total	765763	39858	83365	1432873	40305
U-F	40357						
U-Z.I.	1982						
U-U-	11865						
U-A.P.	101463						
U-S.D.	4738						
A.P.-F	585068						
A.P.-Z.I.	18404						
A.P.-U	43068						
A.P.-A.P.	1454021						
A.P.-S.D.	28625						
S.D.-F	5918						
S.D.-Z.I.	457						
S.D.-U	956						
S.D.-A.P.	12222						
S.D.-S.D.	1522						

Cambio 1985-2015		Cambio 1985-2015					
Cambio	Extensión		Cobertura	Ha conservada	Ha perdida	Ha ganada	total
F-F	2624598		Forestal	2624598	1972676	693338	3317936
F-Z.I	3974		Zona inundada	56674	109128	16979	73653
F-U	28814		Uso urbano	11069	164254	81107	92176
F-A.P	1878953		Agrícola-Pastizal	1566958	2171391	2100762	3667720
F-S.D.	60935		Suelo desnudo	1581	20021	89882	91463
Z.I.-F	13381						
Z.I.-Z.I	56674			área ganada			
Z.I.-U	3689		Forestal	Zona inundada	Uso urbano	Agrícola-Pastizal	Suelo desnudo
Z.I.-A.P.	32903		13381	3974	28814	1878953	60935
Z.I.-S.D.	2481		109684	1957	3689	32903	2481
N-F	109684		35203	1613	3400	64030	228
N-S.D.	1957		531351	9041	42808	111364	5005
N-U	3400		3719	394	2396	13512	21233
N-A.P.	64030	total	693338	16979	81107	2100762	89882
N-S.D.	228						
U-F	35203						
U-Z.I.	1613						
U-U-	11069						
U-A.P.	111364						
U-S.D.	5005						
A.P.-F	531351						
A.P.-Z.I.	9041						
A.P.-U	42808						
A.P.-A.P.	1566958						
A.P.-S.D.	21233						
S.D.-F	3719						
S.D.-Z.I.	394						
S.D.-U	2396						
S.D.-A.P.	13512						
S.D.-S.D.	1581						

Cambio 1995-2001		Cambio 1995-2001					
Cambio	Extensión		Cobertura	Ha conservada	Ha perdida	Ha ganada	total
F-F	3154937		Forestal	3154937	1004715	713902	3868839
F-Z.I	14503		Zona inundada	53941	77541	44885	98826
F-U	28533		Uso urbano	10197	206718	85037	95234
F-A.P	957835		Agrícola-Pastizal	1675236	2417146	1211713	2886949
F-S.D.	3844		Suelo desnudo	2899	58730	43696	46595
Z.I.-F	10283						
Z.I.-Z.I	53941						
Z.I.-U	516			área ganada			
Z.I.-A.P.	12106		Forestal	Zona inundada	Uso urbano	Agrícola-Pastizal	Suelo desnudo
Z.I.-S.D.	695		10283	14503	28533	957835	3844
N-F	11512		11512	931	516	12106	695
N-S.D.	931		36091	1917	1985	54424	140
N-U	1985		635198	26839	50712	153422	5091
N-A.P.	54424		20818	695	3291	33926	33926
N-S.D.	140	Total	713902	44885	85037	1211713	43696
U-F	36091						
U-Z.I.	1917						
U-U-	10197						
U-A.P.	153422						
U-S.D.	5091						
A.P.-F	635198						
A.P.-Z.I.	26839						
A.P.-U	50712						
A.P.-A.P.	1675236						
A.P.-S.D.	29161						
S.D.-F	20818						
S.D.-Z.I.	695						
S.D.-U	3291						
S.D.-A.P.	33926						
S.D.-S.D.	2899						

Cambio 1995-2009		Cambio 1995-2009					
Cambio	Extensión		Cobertura	Ha conservada	Ha perdida	Ha ganada	Total
F-F	2209869		Forestal	2209869	1795043	511340	2721209
F-Z.I	2983		Zona inundada	56074	80054	19315	75389
F-U	108542		Uso urbano	10410	201054	179389	189799
F-A.P	1681629		Agrícola-Pastizal	1843693	2382234	1952835	3796528

F-S.D.	1889		Suelo desnudo	3041	58871	11034	14075
Z.I.-F	8555						
Z.I.-Z.I	56074						
Z.I.-U	973			área ganada			
Z.I.-A.P.	14363		Forestal	Zona inundada	Uso urbano	Agrícola-Pastizal	Suelo desnudo
Z.I.-S.D.	89		8555	2983	108542	1681629	1889
N-F	15474		15474	1397	973	14363	89
N-S.D.	1397		25911	1540	1307	48625	31
N-U	1307		451498	12921	66207	162083	1110
N-A.P.	48625	Total	9902	474	2360	46135	7915
N-S.D.	31		511340	19315	179389	1952835	11034
U-F	25911						
U-Z.I.	1540						
U-U-	10410						
U-A.P.	162083						
U-S.D.	1110						
A.P.-F	451498						
A.P.-Z.I.	12921						
A.P.-U	66207						
A.P.-A.P.	1843693						
A.P.-S.D.	7915						
S.D.-F	9902						
S.D.-Z.I.	474						
S.D.-U	2360						
S.D.-A.P.	46135						
S.D.-S.D.	3041						

Cambio 1995-2015		Cambio 1995-2015					
Cambio	Extensión		Cobertura	Ha conservada	Ha perdida	Ha ganada	total
F-F	2549091		Forestal	2549091	1413900	768850	3317941
F-Z.I	3236		Zona inundada	54419	83974	19233	73652
F-U	21913		Uso urbano	14671	398032	77517	92188
F-A.P	1344366		Agrícola-Pastizal	1909664	2617103	1758107	3667771
F-S.D.	44385		Suelo desnudo	4629	57633	86835	91464
Z.I.-F	9519						
Z.I.-Z.I	54419						
Z.I.-U	3628			área ganada			
Z.I.-A.P.	13672		Forestal	Zona inundada	Uso urbano	Agrícola-Pastizal	Suelo desnudo

Z.I.-S.D.	2736		9519	3236	21913	1344366	44385
N-F	44079		44079	1122	3628	13672	2736
N-S.D.	1122		88082	2181	1212	71731	510
N-U	1212		614277	12155	44811	290090	3008
N-A.P.	71731		12893	539	5953	38248	36196
N-S.D.	510	Total	768850	19233	77517	1758107	86835
U-F	88082						
U-Z.I.	2181						
U-U-	14671						
U-A.P.	290090						
U-S.D.	3008						
A.P.-F	614277						
A.P.-Z.I.	12155						
A.P.-U	44811						
A.P.- A.P.	1909664						
A.P.- S.D.	36196						
S.D.-F	12893						
S.D.-Z.I.	539						
S.D.-U	5953						
S.D.- A.P.	38248						
S.D.- S.D.	4629						

Cambio 2001-2009		Cambio 2001-2009					
Cambio	Extensión		Cobertura	Ha conservada	Ha perdida	Ha ganada	total
F-F	2113318		Forestal	2113318	1441910	608889	2722207
F-Z.I	1700		Zona inundada	57155	96790	18234	75389
F-U	84804		Uso urbano	11282	90473	178516	189798
F-A.P	1354133		Agrícola-Pastizal	2176044	2751226	1620484	3796528
F-S.D.	1273		Suelo desnudo	2586	38664	11489	14075
Z.I.-F	8111		área ganada				
Z.I.-Z.I	57155						
Z.I.-U	1690						
Z.I.-A.P.	29745		Forestal	Zona inundada	Uso urbano	Agrícola-Pastizal	Suelo desnudo
Z.I.-S.D.	89		8111	1700	84804	1354133	1273
N-F	101582		101582	4273	1690	29745	89
N-S.D.	4273		18976	326	11590	145053	532

N-U	11590		478030	11151	77294	59001	888
N-A.P.	145053		2190	784	3138	32552	8707
N-S.D.	532	Total	608889	18234	178516	1620484	11489
U-F	18976						
U-Z.I.	326						
U-U-	11282						
U-A.P.	59001						
U-S.D.	888						
A.P.-F	478030						
A.P.-Z.I.	11151						
A.P.-U	77294						
A.P.-A.P.	2176044						
A.P.-S.D.	8707						
S.D.-F	2190						
S.D.-Z.I.	784						
S.D.-U	3138						
S.D.-A.P.	32552						
S.D.-S.D.	2586						

Cambio 2001-2015		Cambio 2001-2015					
Cambio	Extensión		Cobertura	Ha conservada	Ha perdida	Ha ganada	total
F-F	2550256		Forestal	2550256	1289595	767683	3317939
F-Z.I	3215		Zona inundada	55878	98407	17774	73652
F-U	21999		Uso urbano	10485	94367	81703	92188
F-A.P	1219314		Agrícola-Pastizal	2165796	2875292	1501974	3667770
F-S.D.	45067		Suelo desnudo	2736	38988	88728	91464
Z.I.-F	4503		área ganada				
Z.I.-Z.I	55878						
Z.I.-U	3842						
Z.I.-A.P.	30649		Forestal	Zona inundada	Uso urbano	Agrícola-Pastizal	Suelo desnudo
Z.I.-S.D.	3535		4503	3215	21999	1219314	45067
N-F	120598		120598	4579	3842	30649	3535
N-S.D.	4579		20886	310	3572	157868	6755
N-U	3572		619870	8483	49321	61137	1549
N-A.P.	157868		1826	1187	2969	33006	31822
N-S.D.	6755	total	767683	17774	81703	1501974	88728
U-F	20886						
U-Z.I.	310						
U-U-	10485						

U-A.P.	61137						
U-S.D.	1549						
A.P.-F	619870						
A.P.-Z.I.	8483						
A.P.-U	49321						
A.P.-A.P.	2165796						
A.P.-S.D.	31822						
S.D.-F	1826						
S.D.-Z.I.	1187						
S.D.-U	2969						
S.D.-A.P.	33006						
S.D.-S.D.	2736						

Cambio 2009-2015		Cambio 2009-2015					
Cambio	Extensión (Ha)		Cobertura	Ha conservada	Ha perdida	Ha ganada	total
F-F	2044739		Forestal	2044739	663887	1273202	3317941
F-Z.I	2544		Zona inundada	56884	75085	16770	73654
F-U	11629		Uso urbano	12361	186543	79827	92188
F-A.P	616113		Agrícola-Pastizal	2718630	3775783	949141	3667771
F-S.D.	33601		Suelo desnudo	3119	10924	88346	91465
Z.I.-F	1163						
Z.I.-Z.I	56884						
Z.I.-U	2963				area ganada		
Z.I.-A.P.	11864		Forestal	Zona inundada	Uso urbano	Agrícola-Pastizal	Suelo desnudo
z.i.-s.d.	2211		1163	2544	11629	616113	33601
N-F	262120		262120	850	2963	11864	2211
N-S.D.	850		65869	726	5700	208953	5316
N-U	5700		943601	12617	56347	104957	2630
N-A.P.	208953		449	33	3188	7254	44588
N-S.D.	5316	Tota l	1273202	16770	79827	949141	88346
U-F	65869						
U-Z.I.	726						
U-U-	12361						
U-A.P.	104957						
U-S.D.	2630						
A.P.-F	943601						
A.P.-Z.I.	12617						

A.P.-U	56347						
A.P.- A.P.	2718630						
A.P.- S.D.	44588						
S.D.-F	449						
S.D.-Z.I.	33						
S.D.-U	3188						
S.D.- A.P.	7254						
S.D.- S.D.	3119						

ANEXO 4

Resultado de las operaciones zonales usando la moda de las categorías asignadas a la evapotranspiración en las áreas de captación durante 2001 y 2009. Las categorías son las siguientes: 1= Bajo, 2= Medio bajo, 3= medio alto y 4= Alto. Los valores de AC de 50 mil píxeles esta dividido en varias columnas, pero son valores continuos.

Las siglas usadas son: EVT = evapotranspiración; AC= áreas de captación de 1 millón o 50 mil píxeles

EVT con AC de 1 millón	
2001	2009
4	2
3	4
1	1
3	2
2	2
1	1
1	1
1	1
1	1
4	1
2	1
4	4
1	1
2	1
2	1
1	1
4	2
2	2
2	2

EVT con AC de 50 mil			Continuación AC 50 mil			Continuación AC 50 mil			Continuación AC 50 mil		
2001	2009		2001	2009		2001	2009		2001	2009	
1	1		1	1		3	3		4	4	
4	4		3	3		2	3		1	1	

4	4		2	2		3	3		2	2
3	2		1	1		3	4		4	3
4	2		4	4		1	1		2	2
4	4		3	3		2	3		4	4
4	3		4	4		2	3		3	4
4	1		3	3		1	2		2	2
1	1		1	2		2	2		3	4
1	1		3	2		3	3		2	3
1	1		4	4		3	3		2	2
1	1		4	1		3	3		3	4
1	1		4	2		3	3		4	2
4	3		2	3		4	4		1	1
1	1		2	2		1	1		1	1
1	1		2	2		3	2		4	4
1	1		3	2		4	2		2	2
1	2		4	3		3	3		3	3
1	1		1	1		1	2		3	4
2	2		2	2		4	3		4	4
4	4		3	4		4	4		2	2
4	4		2	2		4	3		3	3
3	3		4	2		2	1		4	4
3	4		1	1		1	1		2	2
3	3		2	2		4	4		2	2
4	4		4	2		4	4		4	2
2	2		2	2		2	2		4	4
4	4		4	4		4	3		3	4
4	2		2	3		1	2		4	4
3	4		3	3		1	1		4	4
3	4		2	3		3	1		1	1
4	2		4	4		4	4		4	3
3	3		4	4		2	2			
4	4		3	3		1	1			

ANEXO 5

Resultado de las operaciones zonales usando la moda de las categorías asignadas a la evapotranspiración y cobertura terrestre en las áreas de captación durante los años 2001 y 2009. Las categorías de evapotranspiración son las siguientes: 1= Bajo, 2= Medio bajo, 3= medio alto y 4= Alto. Las categorías de cobertura terrestre dominantes en las áreas de captación son dos 1= Forestal y 5= Agrícola-pastizal.

Los valores de AC de 50 mil píxeles está dividido en varias columnas, pero son valores continuos.

Las siglas usadas son: EVT = evapotranspiración, CT = cobertura terrestre; AC= áreas de captación de 1 millón o 50 mil píxeles

1 millón de píxeles			
2001		2009	
CT	EVT	CT	EVT
1	4	5	2
1	3	1	4
1	1	5	1
1	3	1	2
5	2	5	2
5	1	5	1
5	1	1	1
5	1	5	1
5	1	5	1
5	4	5	1
5	2	5	1
1	4	1	4
5	1	5	1
5	2	5	1
5	2	5	1
5	1	5	1
5	4	5	2
5	2	5	2

AC 50 mil píxeles									
2001									
CT	EVT	CT	EVT	CT	EVT	CT	EVT	CT	EVT
5	1	5	2	1	3	5	2	1	3
1	4	1	4	1	4	5	4	5	2

1	4	1	4	1	3	5	2	1	3
1	3	1	3	5	1	1	4	1	2
1	4	1	3	1	3	1	2	1	2
1	4	1	3	1	4	1	3	1	3
1	4	1	4	5	4	5	2	5	4
5	4	5	2	1	4	1	4	5	1
5	1	5	4	1	2	1	4	5	1
5	1	1	4	5	2	5	3	1	4
5	1	1	3	5	2	5	3	1	2
5	1	1	3	5	3	5	2	1	3
5	1	1	4	1	4	5	3	1	3
5	4	1	3	5	1	5	3	1	4
1	1	1	4	5	2	5	1	1	2
1	1	5	1	1	3	1	2	1	3
1	1	1	3	5	2	1	2	1	4
1	1	5	2	1	4	1	1	5	2
5	1	5	1	5	1	1	2	1	2
1	4	1	3	1	3	1	3	5	4
1	3	1	4	5	2	5	1	1	4
1	4	1	4	1	4	1	4	1	3
5	1	1	4	5	1	5	1	1	4
1	3	1	2	5	1	5	2	1	4
1	4	1	1	5	3	1	4	5	1
5	3	1	4	1	4	1	2	1	4
5	1	1	4	1	2	1	4		

AC de 50 mil píxeles									
2009									
CT	EVT	CT	EVT	CT	EVT	CT	EVT	CT	EVT
5	1	5	2	3	3	1	4	3	4
5	4	5	3	1	3	5	2	5	2
5	4	5	4	5	3	1	3	5	2
5	2	5	1	5	4	5	2	5	2
1	2	5	3	3	4	1	1	5	4
1	4	5	2	5	3	5	1	1	4
5	3	5	1	5	3	1	4	3	4
5	1	1	4	5	3	5	2	5	4
5	1	5	3	5	3	5	1	5	1
5	1	5	4	5	4	1	4	5	3

5	1	5	3	5	1	5	1		
5	1	5	2	5	3	5	2		
5	1	1	2	1	3	5	3		
5	3	5	4	1	2	5	2		
1	1	5	1	1	2	1	4		
5	1	5	2	5	3	1	4		
5	1	5	3	5	3	5	2		
1	2	5	2	5	3	1	4		
5	1	5	2	5	3	1	3		
5	2	5	2	5	4	1	2		
5	4	5	3	5	1	1	4		
1	4	5	1	1	2	5	2		
5	3	5	2	5	2	5	1		
1	4	1	4	5	3	5	1		
5	3	5	2	5	2	5	4		
3	4	5	2	3	3	1	2		
5	2	1	1	5	4	1	3		
5	4	5	2	3	3	5	4		
5	2	5	2	1	1	5	4		
1	4	5	2	5	1	1	2		
1	4	1	4	5	4	5	3		

ACTA DE EXAMEN DE GRADO



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00017
Matrícula: 2151801028

CARACTERIZACIÓN
MULTITEMPORAL MEDIANTE
PERCEPCIÓN REMOTA Y ANÁLISIS
ESPACIAL DEL CAMBIO DE
COBERTURA TERRESTRE Y SUS
EFECTOS EN LA
EVAPOTRANSPIRACIÓN Y
ALMACENAJE DE CARBONO EN LA
CUENCA USUMACINTA

En la Ciudad de México, se presentaron a las 15:00 horas del día 19 del mes de junio del año 2017 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DRA. CLAUDIA ROJAS SERNA
DR. JUAN MANUEL NUÑEZ HERNANDEZ
DRA. FABIOLA SAGRARIO SOSA RODRIGUEZ



VIOLETA YOALLI ALVARADO ARRIAGA
ALUMNA

Bajo la Presidencia de la primera y con carácter de Secretaria la última, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: VIOLETA YOALLI ALVARADO ARRIAGA

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

APROBAR

Acto continuo, la presidenta del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ

LIC. JULIO CÉSAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JOSE GILBERTO CORDOBA HERRERA

PRESIDENTA

DRA. CLAUDIA ROJAS SERNA

VOCAL

DR. JUAN MANUEL NUÑEZ HERNANDEZ

SECRETARIA

DRA. FABIOLA SAGRARIO SOSA RODRIGUEZ