



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN LA SELVA BAJA
CADUCIFOLIA DEL ESTADO DE MÉXICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN PLANIFICACIÓN PARA
EL DESARROLLO AGROPECUARIO**

P R E S E N T A:

VICTOR MANUEL CABALLERO TINAJERO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL ACOSTA MIRELES



FES Aragón

**CIUDAD NEZAHUALCÓYOTL,
EDO. DE MÉXICO 2018**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a Dios por dame la oportunidad de estudiar y concluir satisfactoriamente una licenciatura.

A mis padres Víctor Caballero Escamilla y Martha Tinajero Acevedo que siempre se han esforzado por darnos una vida digna con valores, educación y estudio, por ser ese ejemplo de lucha, trabajo y generosidad, ya que siempre han estado con sus hijos y en esta etapa de mi vida jamás me dejaron.

A mis hermanos menores Diego y Andrés que siempre están cuando se les necesita y sé que también tendrán en sus manos un trabajo de tesis de licenciatura.

A mi abuelita Elena† por su enorme preocupación de alimentarme siempre que llegaba a su casa y por la oportunidad que me dio de tener en su casa mi casa, a mis tíos y tías que me apoyaron con la alimentación, ayuda económica y un cuarto digno para poder descansar después de las jornadas de escuela y desvelos; mis tías Cande, Lidia y Flora a mi tío Chema y tía Claudia, mi tía Chive y tío Carlos.

Enormemente quiero agradecer al Dr. Ramiro Pérez Miranda, por la asesoría e impartición de conocimientos en este trabajo de tesis, un investigador responsable que se preocupa por el crecimiento de cada alumno que asesora y comparte su conocimiento con vocación de servicio, que me abrió las puertas del laboratorio de geomática para poder comenzar este trabajo y me brindo la confianza para poder plasmarlo en un trabajo de tesis

Quiero agradecer en especial al Dr. Miguel Acosta Mireles, por aceptar ser mi asesor de tesis y ayudarme en cada corrección y defensa de este trabajo de investigación pero en especial por haberme dado parte de su tiempo, muchas gracias Dr. Miguel.

Al Maestro Antonio Gonzales Hernández, por el apoyo que me dio cuando acepto que realizara el servicio social en el laboratorio de geomática del CENID-COMEF ya que me brindo la facilidad de usar las estaciones de trabajo y equipo del laboratorio para realizar esta investigación.

A mis sinodales la Dra. Alma Luz García Jiménez, Maestro Roberto David Juárez Carrejo, Dr. José Antonio Hernández Soto y al Lic. Aurelio Amado Bernal Campos, por el tiempo que me brindaron al leer el trabajo de tesis y el apoyo de realizar las observaciones y destacar los errores para mejorar el trabajo.

En especial agradecer a los profesores de carrera Garrido Román Cutberto por la motivación al trabajo de SIG y al Dr. Teófilo Reyes Couturier† por la enseñanza mostrada dentro del aula, la motivación para terminar un trabajo de investigación y cada una de sus enseñanzas que se quedan en la memoria por siempre.

Reconocimiento

Este trabajo se realizó gracias a fondos Fiscales INIFAP 2015 por brindar los recursos para el apoyo del proyecto:

Estimación de biomasa aérea en tres regiones forestales de México con número de SIGI: 10453832942



**Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias**

Citas

Proverbios 3:13-15

Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría y que obtiene la inteligencia; porque su ganancia es mejor que la ganancia de la plata y sus frutos más que el oro fino, más preciosa es que las piedras preciosas y todo lo que puedes desear, no se puede comparar a ella.

- **Rey Salomón**

Salmo 23

El Señor es mi pastor; nada me faltará.

En lugares de delicados pastos me hará descansar;
Junto a aguas de reposo me pastoreará.

Confortará mi alma;
Me guiará por sendas de justicia por amor de su nombre.

Aunque ande en valle de sombra de muerte,
No temeré mal alguno, porque tú estarás conmigo;
tú vara y tu cayado me infundirán aliento.

Aderezas mesa delante de mí en presencia de mis angustiadores;
Unges mi cabeza con aceite; mi copa está rebosando.

Ciertamente el bien y la misericordia me seguirán todos los días de mi vida, y en la casa de Jehová moraré por largos días.

- **Rey David**

Índice

Introducción	8
Planteamiento del problema	10
Objetivos	16
Objetivo general	16
Objetivos particulares	16
Hipótesis	16
Metodología	17
Capítulo 1. Marco de referencia	21
1.1. El bosque	21
1.2. La selva baja caducifolia, su importancia económica y social en las comunidades y ejidos de la propiedad social	21
1.2.1. La selva baja caducifolia	21
1.2.2. Aprovechamiento forestal.....	22
1.2.3. El aprovechamiento forestal maderable	22
1.2.4. La propiedad social en México, en las comunidades y ejidos forestales.....	25
1.3. El Carbono, el ciclo del carbono y su importancia en los ecosistemas forestales	28
1.3.1. El carbono	28
1.3.2. Fijación de dióxido de carbono.....	28
1.3.3. El ciclo del carbono	29
1.3.4. El carbono en ecosistemas forestales	31
1.4. Biomasa aérea	33
1.4.1. Biomasa	33
1.4.2. Importancia de la biomasa	33
1.4.3. Determinación de Biomasa aérea	35
1.5. Cambio climático, efectos de cambio climático y la variabilidad del clima en las masas forestales	36
1.5.1. El cambio climático.....	36
1.5.2. Causas y efectos del cambio climático.....	37
1.5.2.1. Causas naturales de Cambio Climático.....	37
1.5.2.2. Cusas antropogénicas de Cambio Climático.....	38
1.5.3. Efectos del cambio climático	41
1.5.3.1. El efecto social del cambio climático	41
1.5.3.2. Los efectos del cambio climático sobre los recursos naturales	42
1.5.3.3. Los efectos del cambio climático sobre las masas forestales	44
1.5.4. Los bosques y el cambio climático	44
1.5.5. Acciones de mitigación de cambio climático	46

1.5.5.1. Principales acciones de mitigación de cambio climático	46
1.5.6. Potencial de servicios ambientales que proporciona el bosque	47
1.5.7. Pago por servicios ambientales.....	48
1.6. Percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis espacial.	50
1.6.1 Percepción remota	50
1.6.1.1 Imágenes de satélite	51
1.6.2. Sistemas de información geográfica	53
1.6.2.1. Componentes de los SIG	54
1.6.3 Análisis espacial.....	55
1.6.4. Aplicación en masas forestales	55
Capítulo 2. Localización y descripción general del Estado de México	57
2.1. Localización del Estado de México	57
2.2. Aspectos físicos del Estado de México	58
2.2.1. Clima	58
2.2.2. Economía	60
2.2.3. Biodiversidad.....	61
Capítulo 3. Estimación de Biomasa aérea en la selva baja caducifolia del Estado de México	63
3.1. Zona de base de datos.....	63
3.2. Descripción del método	67
3.2.1. Satélite Landsat 7.....	67
3.2.2. Teledetección e Índices de Vegetación	69
3.3. Adquisición de las imágenes Landsat 7 ETM+ SLC-off.....	71
3.3.1. Preprocesamiento de las imágenes Landsat 7 ETM+ SLC-off.....	74
3.3.2. Cálculo de los índices de vegetación NDVI, DVI y GNDVI.....	76
.....	77
3.4. Obtención de datos del Inventario Forestal	77
3.4.1 Análisis estadísticos	79
Capítulo 4. Resultados y discusión	81
4.1. Variables auxiliares: NDVI, GNDVI y DVI.....	81
4.3. Modelos de regresión lineal.....	87
Conclusiones.....	88
Impactos de la metodología	89
Bibliografía.....	90

Índice de tablas

Tabla 1: Volumen (miles de m ³ r) de la producción forestal maderable según el grupo de especie, para los años 2010, 2011, 2012, 2013 y 2014.	24
Tabla 2: Distribución regional de la propiedad social.	26
Tabla 3: Componentes de un SIG.	54
Tabla 4: Conglomerados de selva baja caducifolia.	65
Tabla 5: Algunas características del satélite Landsat 7 ETM+	68
Tabla 6: Escenas Landsat ETM+ SLC-off	73
Tabla 7: Ecuación de volumen total general para selva baja caducifolia.	78
Tabla 8: Ecuación de biomasa total para selva baja caducifolia.	78
Tabla 9: Índices de Vegetación por conglomerado en época seca del año con fecha del 21 de Diciembre.	81
Tabla 10: Reflectancia de bandas espectrales.	84
Tabla 11: Estadísticas de las variables dasométricas utilizadas en el ajuste.	86
Tabla 12: Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables espectrales y las variables forestales área basal (AB), volumen (VOL) y Biomasa (B).	86
Tabla 13: Modelos de regresión lineal múltiple.	87

Índice de figuras

Figura 1: tendencias de la producción forestal maderable del año 1991 a 2014. .	24
Figura 2: ciclo del carbono	31
Figura 3: Flujo y almacenes de carbono en un ecosistema forestal.....	32
Figura 4: Biomasa viva y total de los principales ecosistemas terrestres	34
Figura 5: Componentes de la producción aérea de un bosque	35
Figura 6: Esquema de calentamiento global	39
Figura 7: Ciclo de un SIG	54
Figura 8: Selva baja caducifolia.....	56
Figura 9: Ubicación del estado de México	57
Figura 10: Clima del estado de México.	58
Figura 11: Precipitación pluvial en el Estado de México	60
Figura 12: Municipios donde se ubica la base de datos.....	64
Figura 13: Ubicación física de los conglomerados	66
Figura 14: Delimitación de conglomerados y sus sitios de muestreo.....	67
Figura 15: Escaneo según funcionamiento del SCL.....	69
Figura 16: Visualizador GloVis para descarga de imágenes satelitales	72
Figura 17: Escenas Landsat descargadas para el Path 27/Row 47 del año 2010.	72
Figura 18: Ejemplo de una selección corregida por bandeado.	75
Figura 19: Ejemplo de resultado de índice de vegetación (NDVI) por conglomerado.....	77
Figura 20: LE70270472010355ASN00 Diciembre de 2010.....	83

Introducción

Las diferentes actividades humanas han ocasionado de manera directa o indirecta la composición de la atmosfera que agregadas a las variaciones climáticas de manera natural que han provocado el clima se vea afectado a nivel mundial, (Santiago 2008).

La evolución del clima a lo largo de periodos más o menos largo de años depende de la suma de los efectos naturales y de los derivados de la actividad humana, o antropogénicos, y especialmente los denominados gases de efecto invernadero (Useros, 2012)

Los bosques almacenan carbono en la vegetación y en el suelo, e intercambian carbono con la atmósfera a través del proceso fotosintético y la respiración, por ello son sistemas naturales que contribuyen a mitigar el cambio climático global. De esta manera, se justifica la importancia de los estudios de biomasa forestal porque permiten evaluar los efectos de una intervención con respecto al equilibrio del ecosistema (Teller, 1988). Su determinación permite estimar contenido de carbono, servicios ambientales para fines de aprovechamiento y manejo forestal.

La mayoría de los inventarios forestales están enfocados a proporcionar información de la estimación maderable, sin embargo, la necesidad de conocer la cantidad de biomasa almacenada en bosques y selvas, adquiere importancia con el tema relacionado con el calentamiento global o cambio climático, de acuerdo con la CONAFOR (2009) a pesar de que el clima cambia naturalmente, existen claras evidencias de que el calentamiento del planeta registrado en los últimos 50 años puede ser atribuido a los efectos de las actividades humanas, esto por la generación de los gases de efecto invernadero (GEI) que se generan desde hace miles de millones de años de fuentes naturales como el vulcanismo, la vegetación y los océanos, sin embargo, debido a las actividades de los humanos, también hemos contribuido a su generación e incremento por el uso, cada vez mayor, de los combustibles fósiles para la industria, uso de los combustibles fósiles generación de gas natural o carbón, etc.

Dado que la captura de carbono contribuye de manera directa en la mitigación de los efectos del cambio climático. Los bosques y selvas capturan, almacenan y liberan carbono como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y degradación de materia seca. El saldo es una captura neta positiva cuyo monto depende del manejo que se le dé a la cobertura vegetal, así como de la edad, distribución de tamaños, estructura y composición de ésta.

Un inventario forestal es una forma para la cuantificación de variables forestales, generalmente realizados en una escala local. Implementarlos a escalas mayores eleva sustancialmente los costos y es financieramente inviable para un monitoreo permanente y en grandes superficies forestales.

En la actualidad, el procesamiento de imágenes de satélite y datos dasométricos pueden generar variables auxiliares susceptibles a emplearse en modelos de estimación de la biomasa forestal de un ecosistema. La ventaja de la aplicación de estos métodos y técnicas contribuye a estimar de manera práctica la cantidad de biomasa que contiene una región relativamente grande, después de haber relacionado la cuantificación de biomasa y características directamente en campo con las características de las imágenes, para generar los modelos.

Los sensores remotos en combinación con métodos de análisis geoespacial, ofrecen herramientas importantes para la medición de variables biofísicas del bosque con costo menor que el inventario forestal tradicional y a escalas espaciales y temporales mayores. Se han obtenido excelentes resultados para evaluar y predecir propiedades de los ecosistemas, en estudios desarrollados para monitorear los recursos forestales a través del uso de datos recolectados mediante sensores remotos con apoyo de información de campo obtenida en inventario forestal. Analizar la relación entre los datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) de México y datos espectrales provenientes de imágenes LANDSAT 7 ETM+ (para dos épocas del año: seca y húmeda), para estimar espacialmente el área basal, el volumen y biomasa en selva baja caducifolia en el Estado de México.

Planteamiento del problema

Los efectos del cambio climático y la variabilidad del clima en los ecosistemas forestales son evidentes en todo el mundo y sus impactos son inevitables. Los desafíos que plantea el cambio climático requerirán ajustes en las políticas forestales y cambios en los planes y las prácticas de manejo forestal. Los ecosistemas forestales son reservorios de diversidad biológica terrestre más grande del mundo. Asimismo, desempeñan un papel fundamental en la adaptación y mitigación del cambio climático mundial y contribuyen a la conservación del suelo y el agua en muchos ecosistemas frágiles. De manera particular, se ha reconocido que los bosques son grandes reservorios de carbono (FAO, 2012; 2013).

Por lo tanto, la estimación adecuada de la biomasa de un bosque, es un elemento de gran importancia debido a que esta permite determinar los montos de carbono que representa la cantidad potencial de carbono que puede ser liberado a la atmósfera, o conservado y fijado en una determinada superficie cuando los bosques son manejados para alcanzar los compromisos de mitigación de gases de efecto invernadero (Brown, *et al.*, 1996).

La biomasa es el conjunto de materiales orgánicos generados a partir de la fotosíntesis o de la cadena biológica que existe en un determinado tiempo y espacio. Esta se mide en unidades de peso, por unidad de superficie. La biomasa forestal es la materia orgánica obtenida de la producción primaria a través de la fotosíntesis menos el consumo mediante de la respiración y la cosecha (FAO, 2013). Incluye el peso de la materia orgánica por encima y por debajo del suelo de un ecosistema forestal; la estimación se compone de todo el componente que forma parte de la vegetación: ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta y se expresa en términos de peso verde o de peso seco libre de cenizas (Garcidueñas, 1987; Schlegel *et al.*, 2000).

La biomasa aérea del bosque es un indicador para determinar el estado de conservación de los bosques y el valor económico. Un método para medir la biomasa es la biometría que implica procedimientos de muestreo destructivo con costos elevados y a veces impráctico, por ello es común estimar la biomasa mediante muestreos de inventarios forestales a través de ecuaciones alométricas que son modelos matemáticos en donde con solo medir una o varias de sus variables, se puede determinar la cantidad de biomasa que contiene un individuo. La biomasa responde a patrones físicos, biológicos y de manejo como: región geográfica, calidad de sitio, elevación, exposición, pendiente, clima, cambios estacionales, especie, variación genética, edad, fertilización, densidad del rodal, sistema silvícola aplicado, contaminación atmosférica, entre otros (Garcidueñas, 1987). La biomasa de los diferentes componentes arbóreos aumenta a través del tiempo, su concentración aérea se distribuye de la siguiente manera: el fuste principal concentra entre 55 y 70% del total del árbol, las ramas de 5 al 37%, el follaje de 1 al 15% y la corteza de 5 al 16% (Schlegel *et al.*, 2000).

Las principales causas que provocan la disminución de la biomasa en los ecosistemas forestales pueden ser de tipo físico, biológico y antropogénico. Entre las primeras se encuentran los huracanes, sequías, tormentas, incendios, vientos fuertes y lluvias torrenciales; las causas de tipo biológico pueden ser ataques de plagas y enfermedades, y las causas de tipo antropogénico son cambio de uso de suelo, deforestación y pastoreo (Foley *et al.*, 2007; Gasparri *et al.*, 2007).

Las principales causas físicas que provocan la disminución de biomasa forestal

Las principales causas físicas que provocan disminución de biomasa forestal son los huracanes y los incendios forestales. Ovalles (2011) menciona que debido a su ubicación geográfica y topográfica, algunas regiones forestales están permanentemente expuestas a la ocurrencia de huracanes y lluvias intensas que provocan grandes daños a la vegetación y los demás recursos asociados, describe que los incendios forestales se repiten regularmente en las áreas de bosques por razones naturales, por descuidos humanos o por manos criminales lo que

contribuye a la deforestación y degradación de los bosques del país. (Geilfus, 2002 citado por Ovalles, 2011). Por ejemplo, entre el periodo de los años 2010 a 2017, en México se registraron 6,073 incendios forestales que afectaron 56,544.04h (CONAFOR, 2017).

Principales causas biológicas que provocan la disminución de biomasa forestal

Los Insectos y las enfermedades son componentes integrantes de los ecosistemas forestales y normalmente se presentan con una densidad relativamente baja, causando pocos daños y con efectos insignificantes sobre el crecimiento y el vigor de los árboles. Sin embargo algunas veces, determinadas especies pueden alcanzar rápidamente números dañinos, la distribución espacial puede aumentar y la epidemia puede persistir durante un tiempo variable, y es cuando se ha requerido la intervención del hombre para controlar la población de la plaga. Estas proliferaciones pueden tener efectos adversos sobre muchos aspectos de los bosques, como crecimiento de los árboles, supervivencia, rendimiento y calidad de la madera y de otros productos forestales, y conservación del suelo y del agua (FAO, 2010).

En décadas recientes se han combinado dos importantes factores que aumentan la amenaza que representan las plagas para los bosques:

- El volumen, la velocidad y la diversidad del comercio en el mundo han incrementado las oportunidades para que las plagas se propaguen varios ejemplos se han dado; cuando se exportan e importan hortalizas, granos, frutas y plantas, las plagas se trasladan de un punto a otro cuando no se toman las medidas necesarias, no hay un estricto control legal.
- El cambio climático parece estar intensificando la probabilidad de que se establezcan las plagas y de que las plagas nativas y las introducidas tengan efectos más graves.

Los problemas generados por insectos y enfermedades suelen ser de carácter cíclico o crónico, y requieren inversiones a largo plazo en obtención de datos. Una

alteración crónica puede ser causada por una combinación de especies de insectos y de enfermedades y no por uno solo de estos factores. Puede haber diversidad no solo en las especies detectadas, sino también en los efectos de cada especie dentro de cada alteración concreta

Las plagas, tanto nativas como introducidas, representan una de las mayores amenazas para los bosques (FAO, 2010).

Principales causas antropogénicas que provocan la disminución de biomasa forestal

Las causas antropogénicas son las más diversas y aquellas que provocan la disminución de biomasa forestal, estas por actividades humanas Ovalles (2011), el mismo autor realiza la siguiente clasificación:

- Expansión agrícola

La expansión de las diferentes formas de agricultura y ganadería constituyen el factor directo que predomina como responsable de más del 60% de la deforestación en México.

- Expansión de la ganadería

La producción pecuaria es uno de los usos más importantes, en cuanto a competencia y sustitución de bosques. La ganadería extensiva es el sistema de uso del suelo que ha sustituido de forma permanente la cobertura boscosa, los ganaderos han desmontado áreas forestales para convertirlas en pastizales.

- Extracción de productos forestales

La extracción de productos forestales como leña, resina, heno, musgo, hongos silvestres, tierra de monte, plantas vivas, pastoreo libre; la mayoría de estos productos, utilizados como fuentes de ingresos y medios de vida importante para los sectores más pobres de la población rural, ya que con pocas alternativas disponibles, los pobladores de las zonas rurales consideran los bosques como la solución a corto plazo de sus problemas económicos.

- Construcción de infraestructura

Muchos bosques del país han sido talados para la construcción de caminos, asentamientos humanos, servicios públicos, redes eléctricas, tuberías de distribución, presas hidroeléctricas y otras obras de infraestructuras. Por sus efectos indirectos, la construcción de carreteras es el que más contribuye a la deforestación, tiene un impacto inmediato (deforestación) y diferido (erosión, derrumbes). Las infraestructuras productivas, como represas hidroeléctricas, complejos turísticos e industriales, y la expansión de las áreas urbanas provocan la eliminación total de la cobertura forestal, la cual nunca volverá a ser recuperada.

- Minería

Los daños ocasionados por la minería pueden ser no sólo en los espacios donde se produce la extracción, sino también en sus inmediaciones por la degradación de la flora, fauna y el suelo, incluso hasta cambiar la fisiografía del lugar.

Dentro del tema del cambio climático la biomasa forestal presenta dos oportunidades para amortiguarlo:

A través de la adaptación y la mitigación, dos respuestas principales al fenómeno cambiante. La mitigación se ocupa de las causas del cambio climático y la adaptación aborda sus impactos.

En el sector forestal, la adaptación abarca los cambios en las prácticas de manejo planificadas para disminuir la vulnerabilidad de los bosques ante el cambio climático. Las estrategias de mitigación en el sector forestal se pueden agrupar en cuatro categorías principales: la reducción de las emisiones derivadas de la deforestación, la reducción de las emisiones derivadas de la degradación forestal, el fortalecimiento de los sumideros forestales de carbono y la sustitución de productos (FAO, 2012; 2013).

Para el cálculo de la biomasa de los ecosistemas forestales del país. Existen al menos dos métodos para conocer la cantidad de biomasa de un bosque:

- 1) Usar datos de inventario forestal únicamente.

- 2) Usar estos datos junto con la información proveniente de sensores remotos.

En ambos casos el objetivo es obtener estimaciones precisas del parámetro de interés forestal (biomasa). (Labrecque *et al.*, 2006; Hall *et al.*, 2006), para caso de esta investigación se utilizó el ajuste de modelos matemáticos mediante regresión entre las variables auxiliares y los datos espectrales de las imágenes de satélite (Labrecque *et al.*, 2006; Hall *et al.*, 2006);

Objetivos

Objetivo general

- Estimar la biomasa aérea en la selva baja caducifolia de seis municipios de la región sur del Estado de México mediante el uso de imágenes de satélite Landsat 7 ETM+.

Objetivos particulares

- Identificar en la selva baja caducifolia la cantidad de biomasa aérea aplicando el método de muestreo convencional que consiste en un inventario forestal con datos del muestreo del INFyS y realizar una regresión entre los valores de biomasa encontrados en campo y firmas espectrales con las bandas: 1 (azul:A), 2 (verde: V), 3 (Roja: R), 4 (Infrarrojo Cercano1: IRC1), 5 (Infrarrojo Cercano2: IRC2) y 6 (Infrarrojo Medio: IRM), para generar modelos relacionando la cantidad de biomasa en función de los valores del índice de vegetación de diferencias normalizado que presentan las imágenes Landsat 7 ETM+.
- Generar un modelo práctico para estimar la biomasa aérea de la selva baja caducifolia mediante el uso de los valores del índice de vegetación de diferencias normalizado que presentan las imágenes Landsat 7 ETM+ para aplicarlos en la región de la selva baja caducifolia del Estado de México.

Hipótesis

La estimación de la biomasa forestal aérea usando el método combinado (imágenes satelitales como variables auxiliares) es más práctico que el método convencional debido a que las estimaciones se pueden hacer de manera rápida y un menor costo, porque son aplicables en grandes áreas.

Metodología

El estudio se realizó en seis municipios el Estado de México en las zonas forestales, en el ecosistema forestal de selva baja caducifolia.

De los siguientes criterios se definió:

- 1) El número y calidad de escenas de las imágenes de satélite (libre acceso y sin presencia de nubes -nula o mínimo 10% de presencia).
- 2) Disponibilidad en fecha de los datos del Inventario Nacional Forestal y las imágenes de satélite (con sincronía ambas fuentes de información).

1. Adquisición y pre-procesamiento de imágenes de satélite

La delimitación del ecosistema forestal bajo estudio se realizó con el programa de la cobertura de Uso del Suelo y Vegetación de la Serie V de INEGI. En un programa de sistema de información geográfica para delimitar la selva baja caducifolia en el Estado de México.

Se adquirieron las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ o Landsat 8 OLI-TIR de las zonas de estudio, de acceso libre y sin costo, de la página <http://glovis.usgs.gov/>. Del Estado de México, una escena que abarca el espacio de la selva baja caducifolia. A las imágenes obtenidas se sometieron a un pre-procesamiento de corrección geométrica, radiométrica y atmosférica, así como se estimó la reflectancia de la superficie.

En la corrección geométrica se utilizaron los modelos de elevación digital del terreno disponibles en la página de INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>) y/o de las coberturas topográficas de INEGI, escala 1:50,000. Se utilizó el método de muestreo de vecino más cercano en cada escena con un Error Cuadrático Medio por debajo de un pixel (10 m); el sistema de coordenadas a usar será Universal Transversa de Mercator (UTM) con datum y elipsoide WGS84. La corrección radiométrica de las escenas de fechas diferentes serán reescaladas a los valores registrados en las imágenes (números digitales –DN) a reflectancia exoatmosférica adimensional

(Ingram *et al.*, 2005; Thenkabail *et al.*, 2004; Soudani *et al.*, 2006). La corrección atmosférica se llevará a cabo mediante la combinación de la corrección radiométrica y el método mejorado de sustracción del objeto oscuro (Modelo COST) (Chavez, 1996).

Para conseguir las reflectancias para cada banda se convertirán de ND a radiancia. Este proceso se realizará mediante la siguiente ecuación:

$$L\lambda = ND/A$$

Dónde:

$L\lambda$ = Radiancia espectral, en la apertura del sensor en $\text{watts/m}^2 \times \text{steradian} \times \mu\text{m}$, para cada banda.

DN = Números digitales para cada banda (0 a 255).

A = Ganancia de calibración absoluta en $\text{watts/m}^2 \times \text{steradian} \times \mu\text{m}$ para cada banda, obtenida de los metadatos de la imagen.

2. Integración en mosaico de las imágenes

El pre-procesamiento (corrección geométrica, radiométrica y atmosférica) de las imágenes, generó un mosaico de los ecosistemas forestales en el Estado y para cada tiempo (año) para facilitar los procesos generación de las variables auxiliares (forestales). Para extraer la información de los ecosistemas forestales bajo estudio se utilizó la cobertura de Uso de Suelo y Vegetación del año 2010 que es el más próximo al año en que se obtuvo la información del inventario del INFyS.

- Obtención de índices (variables auxiliares)
- Firmas espectrales e índices de vegetación

Las variables auxiliares generadas de las imágenes LANDSAT se obtuvieron a partir de las seis bandas espectrales, y se consiguieron de dos formas. La primera se hizo generando firmas espectrales con las bandas: 1 (Azul: A), 2 (Verde: V), 3 (Roja: R), 4 (Infrarrojo Cercano1: IRC1), 5 (Infrarrojo Cercano2: IRC2) y 6 (Infrarrojo Medio:

IRM). La segunda se hizo realizando transformaciones matemáticas aplicadas a las bandas 2, 3, 5 y 6, para obtener los siguientes índices:

1. índice de vegetación de diferencias normalizado: $NDVI_{23} = (IRC - R) / (IRC + R)$ (Wijaya et al., 2010).
2. índice de vegetación de diferencias normalizado del verde: $GNDVI = (IRC - V) / (IRC + V)$ (Poulain et al., 2010).
3. $IV = IRC - R$ (ERDAS, 2011).

La generación de las firmas espectrales y las operaciones matemáticas se llevó a cabo en el programa ERDAS Imagine 2013 y complementariamente en el sistema de información geográfica ArcMap 10.x.

- Datos del Inventario Nacional Forestal
- Obtención de datos del INFyS

La base de datos dasométricos de los ecosistemas forestales del área de trabajo bajo estudio se obtuvo del Inventario INFyS 2004-2009, el cual fue gestionado en la Gerencia de Geomática e Inventario de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). El proyecto del inventario nacional forestal a la fecha tiene información dasométrica en más de 25,000 unidades de muestreo distribuidas en toda la República Mexicana. Se usarán ecuaciones generales para estimar de manera directa la biomasa de un rodal por unidad de superficie y total.

Los datos de referencia bajo estudio fueron; el diámetro normal (D_n), altura de árboles (H) y cobertura arbórea (Coa). Se recopilaron las ecuaciones de biomasa de las especies o grupos de especies correspondientes a los ecosistemas forestales de la región. En los casos en donde no haya ecuaciones de biomasa se usaron ecuaciones de volumen y con el valor de la densidad de la madera, se calculó su biomasa. Con base en datos dasométricos y ecuaciones de biomasa (o volumen) se obtuvo la biomasa por conglomerado, para lo cual el atributo de interés (biomasa) se dividió entre el área efectivamente muestreada.

3. Estimaciones del área basal, volumen y cobertura arbórea

La base de datos de los conglomerados del INFyS analizada y procesada se obtuvo la biomasa aérea y cobertura arbórea. El área basal (AB) se calculó a partir de las mediciones de diámetro normal (Dn) empleando la fórmula:

$AB=0.7854DN^2$ expresada en m^2/ha .

DN: Diámetro normal (cm) y AB: Área basal (m^2/ha).

El volumen se estimó usando la ecuación propuestas por el INFyS, de acuerdo al sitio definido, de esa manera se aplicaron las ecuaciones alométricas por grupo de especies, de la zona de bosque templado: coníferas y selva tropical: especies de la selva. La cobertura arbórea de los árboles se determinó utilizando la fórmula:

$$Cob = Dc^2 \times (\pi/4)$$

Donde Cob: Cobertura arbórea estimada (m^2)

Dc: diámetro de copa (m).

El porcentaje de Cob se calculó en base a la relación de la cobertura total por conglomerado y dividiendo entre su superficie ($10,000 m^2$) para multiplicarlo por 100 (Kimothi *et al.*, 2009).

4. Datos satelitales y su relación con parámetros biofísicos

Al considerar como variable dependiente la biomasa (obtenida por conglomerado de los datos dasométricos) y como independiente el valor (o valores) de las imágenes satelitales se probaron modelos de regresión múltiple a fin de identificar aquel modelo que genere predicciones con mayor precisión. Después con el modelo más adecuado desde el punto de vista estadístico se generó un mapa con el fin de representar la variabilidad espacial de la biomasa.

Por otro parte, se obtuvieron estimaciones de biomasa por unidad de superficie y el total usando método media de razones (MR).

La comparación entre ambos métodos será vía intervalos de confianza al 95% del (MR).

Capítulo 1. Marco de referencia

1.1. El bosque

Los bosques son zonas arboladas o ecosistemas dinámicos en los que continuamente se llevan a cabo procesos de regeneración, crecimiento y muerte. A través de la silvicultura y el manejo forestal adecuados se regulan estos procesos naturales, con el fin de producir bienes, como madera y productos no maderables; servicios ecosistémicos, como regulación hidrológica a través de la protección de cauces y zonas ribereñas, así como sitios para la recreación y el esparcimiento (Cortés et al. 2014).

1.2. La selva baja caducifolia, su importancia económica y social en las comunidades y ejidos de la propiedad social

1.2.1. La selva baja caducifolia

De acuerdo con Rzedowski (2006), la denominación de selva baja caducifolia o bosque tropical caducifolio es un grupo de bosques que se encuentran en un clima cálido y es dominado por especies arborescentes que pierden sus hojas en la época seca del año durante un lapso variable pero que por lo general oscila alrededor de seis meses.

De acuerdo a la descripción de Rzedowski (2006) describe que la selva baja caducifolia se desarrolla en México entre 0 y 1900 m de altitud, más frecuentemente por debajo de la cota de 1500m, el tipo de clima más común correspondiente a esta formación vegetal es el Aw, aunque también hay algunos sitios con climas BS y Cw la temperatura media anual es del orden de 20 a 29 °C, siendo más alta en algunas depresiones interiores y no necesariamente al nivel del mar, la precipitación media anual varía entre 300 y 1800 mm (más frecuentemente entre 600 y 1200mm), el bosque muestra una franca preferencia por suelos someros pedregosos y se localiza a menudo sobre laderas de cerros las características más importantes

bastante variables, pues las texturas pueden variar de arcilla a arena, el pH de ácido a ligeramente alcalino, pueden ser pobres o ricos en materia orgánica y de colores claros u oscuros, rojizos, amarillentos, grisáceos, cafés o negros. En general estos son suelos bien drenados y por lo común jóvenes, con características derivadas de la roca madre, que puede ser tanto ígnea, como metamórfica y no pocas veces sedimentaria marina.

Su distribución geográfica es particularmente característica de la vertiente pacífica de México, donde cubre grandes extensiones prácticamente ininterrumpidas desde el sur de Sonora y del suroeste de Chihuahua hasta Chiapas y se continúa en Centroamérica (Rzedowski, 2006).

1.2.2. Aprovechamiento forestal

El aprovechamiento forestal significa una intervención al bosque para obtener sus productos pero basado en un estudio de manera tal que su manejo sea sustentable, lo cual quiere decir que el bosque proporcione bienes y servicios por siempre y que los dueños del bosque obtengan los beneficios de manera directa, sin intermediarios (Geres y Purata, 2008), la importancia de un manejo consensuado, racional y equitativo de los recursos por sus propios habitantes es un aspecto prioritario que se debe considerar para poder desarrollar sustentablemente este sector a nivel nacional (Valdés y Negreros, 2010).

1.2.3. El aprovechamiento forestal maderable

El manejo forestal responsable permite mantener a los bosques sanos y productivos, implica una visión de cambio y adaptación continua y tiene como finalidad mantener o aumentar el valor económico, social y ambiental de todos los tipos de bosque, en beneficio de las generaciones presentes y futuras (Cortés *et al.* 2014) y se realiza en base a una norma o ley forestal y es regulado por la SEMARNAT.

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable define el aprovechamiento forestal como la extracción de los recursos forestales del medio en que se encuentren, incluyendo los maderables y los no maderables (Duran, 2010).

La CONAFOR (2003) define al aprovechamiento forestal como la extracción de recursos forestales de una cierta región que cuenta con el recurso, ya sean maderables o no maderables, pero de una manera sostenible es decir que se conserve la integridad de los bosques, para así conservar este recurso a largo plazo.

El aprovechamiento forestal incluye el aprovechamiento de productos forestales maderables y no maderables, los primeros son los más aprovechados y principales en proveer de recursos económicos a las comunidades y/o ejidos. De los bienes que proveen los bosques, selvas y matorrales el más aprovechado es la madera (CONAFOR, 2003).

En México, la producción forestal maderable sufrió varias fluctuaciones. Para poner un ejemplo tenemos que se reportó un volumen de 7.7 millones de m³r (metro cubico por rollo) en 1991, disminuyendo en un valor mínimo de 6.3 millones de m³r en 1995 (INEGI, 2008).

A partir de 1996 se dio un aumento en la producción, la cual ascendió en 6.6 millones de m³r, esta tendencia se mantuvo al aumento hasta el año 2000, en el que se aportó una producción de 9 millones de m³r. Posteriormente, se volvió a presentar una baja que culmino en 2008 con un volumen de 8.5 millones de m³r (INEGI, 2008).

En el año 2009 disminuyo a 7.5 millones de m³r en el 2012 se dio una baja a 7 millones de m³r que se mantuvo para los años 2013 y 2014 (INEGI, 2015). En la Figura 1 se pueden apreciar estas tendencias.

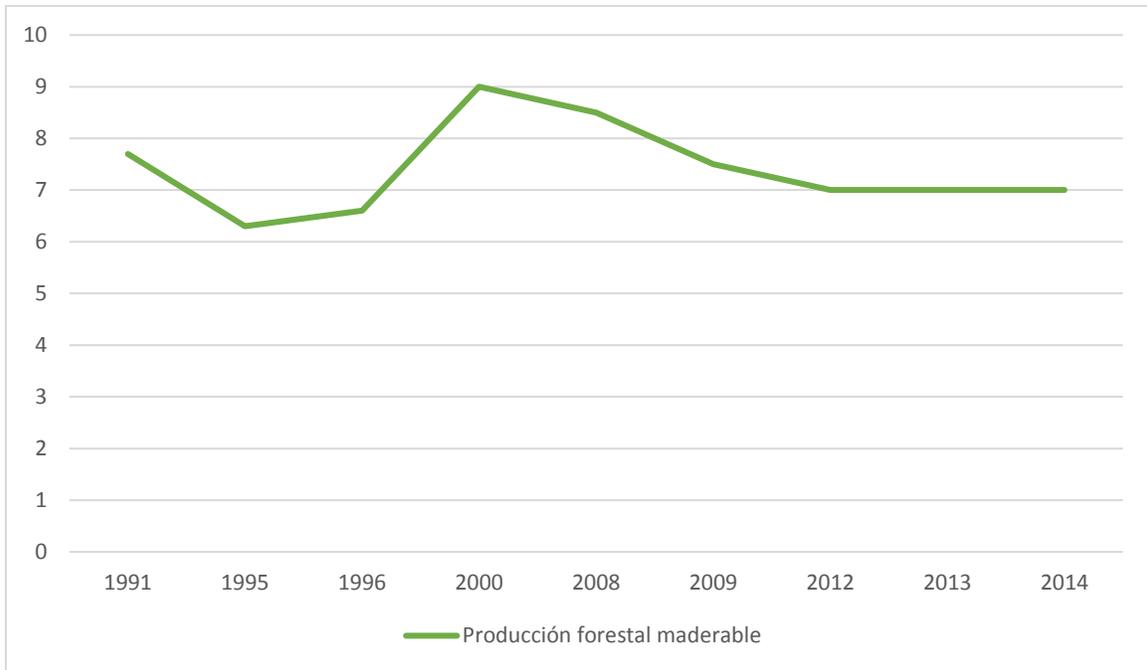


Figura 1: tendencias de la producción forestal maderable del año 1991 a 2014.

De acuerdo al anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos (2015), el volumen y valor de la producción forestal nacional maderable según grupo de especies, se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 1: Volumen (miles de m³r) de la producción forestal maderable según el grupo de especie, para los años 2010, 2011, 2012, 2013 y 2014.

Especies/ años	2010	2011	2012	2013	2014
Pino	4 241	4196	4723	4649	4310
Oyamel	201	169	156	170	182
Otras coníferas	46	24	20	31	27
Encino	548	523	522	511	492
Otras latifoliadas	247	272	232	280	288
Preciosas	51	17	13	22	25
Comunes tropicales	292	300	244	295	276

Fuente: Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos, (INEGI, 2015).

En la Tabla 1 se aprecia como la producción de madera en los últimos años se ha mantenido estable sin bajas ni altas considerables. No se encuentran los datos de la producción para estos últimos dos años.

1.2.4. La propiedad social en México, en las comunidades y ejidos forestales

La metodología para el cálculo de biomasa aérea es una herramienta útil para la toma de decisiones a favor de las comunidades o ejidos en cuestiones de aprovechamiento forestal y/o pago por servicios ambientales.

Existen dos tipos de propiedad social, los ejidos y las comunidades agrarias. Los ejidos son resultado de la dotación masiva de tierras que el Estado mexicano entregó a solicitantes de tierras desde los años 1920 y en especial a partir de los 1930 hasta los 1980. En los casos de las comunidades agrarias, el Estado reconoció los derechos históricos de comunidades que en un principio se reconocían como indígenas y que habían ocupado tradicionalmente los territorios que reclamaban como propios. Al cabo de las décadas gran parte de las comunidades perdieron el uso de las lenguas indígenas y el ejido se convirtió en la forma de tenencia social mayoritaria, aún en regiones indígenas, debido a la mayor dificultad de los trámites de reconocimiento de derechos tradicionales a las comunidades agrarias, que los que planteaba la dotación ejidal. De modo que en la actualidad existen comunidades agrarias de población no indígena y ejidos de población indígena (Merino, 2004). .

La regulación de la tenencia de la tierra en México reconoce tres tipos de propiedad: pública, privada y social. La primera corresponde a los terrenos propiedad del Estado (federal o estatal); la segunda es aquella que la nación otorga a particulares, la cual es regulada por las legislaciones estatales, y en la tercera categoría están los núcleos agrarios (NA), divididos en dos regímenes de tenencia de la tierra: el ejido y la comunidad. Actualmente hay 29,441 ejidos y 2,344 comunidades en el territorio nacional. (Reyes, *et. al.* 2012)

De acuerdo con la SRA (2007), la propiedad social incluye los regímenes ejidal y comunal sujetos a la jurisdicción federal, y es regulada por el artículo 27 constitucional y la ley agraria.

IICA (2012), menciona que de las grandes cinco categorías, la propiedad social es la más importante en cuanto a extensión: con 103.98 metros por hectárea, que representan el 35% del territorio nacional, Entre la propiedad social destaca el régimen ejidal, pues los ejidos concentran el 82% de esta (equivalente al 43% del país).

La superficie en régimen de propiedad social (103.7metros por hectárea) está distribuida en 31, 634 núcleos agrarios. El 92% de esas unidades son ejidos y 8% comunidades.

En la Tabla 2, se puede observar la distribución regional de la propiedad social en México.

Tabla 2: Distribución regional de la propiedad social.

Región	Propiedad social		
	Núcleos agrarios (Números)	Superficie (ha)	Proporción de la región.
Noroeste (NO) (Baja California, Baja California sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit)	2,927	22,129,130	54%
Norte (N) (Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí)	5,015	31,878,543	48%
Noreste (NE) (Nuevo León, Tamaulipas)	1,922	4,454,884	31%
Centro Occidente (CO) (Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco, Colima, Michoacán)	4,952	7,194,456	40%
Centro Sur (CS) (Querétaro, Hidalgo, Estado de México, Tlaxcala, Puebla, D.F.)	4,128	4,342,511	44%
Pacífico Sur (PS) (Guerrero, Oaxaca, Chispas)	4,861	12,386,559	54%
Golfo de México (GM) (Veracruz, Tabasco)	4,309	3,930,752	41%
Península de Yucatán (PY) (Yucatán, Campeche, Quintana roo)	1,350	7,872,885	56%
Total	29,464	94,189,821	48%

Fuente: Reyes, *et. al.*, (2012).

Como se puede observar en la Tabla 2 la propiedad social en México es muy importante y abarca una gran cantidad de territorio a nivel nacional en el Estado de México la propiedad social es también importante ya que los recursos económicos obtenidos por una actividad conjunta es para el beneficio del ejido o de la comunidad.

Existen dos tipos de propiedad social, los ejidos y las comunidades agrarias. Los ejidos son resultado de la dotación masiva de tierras que el estado mexicano entregó a solicitantes de tierras desde los años 1920 y en especial a partir del año 1930 hasta 1980. En los casos de las comunidades agrarias, el Estado reconoció los derechos históricos de comunidades que en un principio se reconocían como indígenas y que habían ocupado tradicionalmente los territorios que reclamaban como propios. Al cabo de las décadas gran parte de las comunidades perdieron el uso de las lenguas indígenas y el ejido se convirtió en la forma de tenencia social mayoritaria, aún en regiones indígenas, debido a la mayor dificultad de los trámites de reconocimiento de derechos tradicionales a las comunidades agrarias, a diferencia de los que planteaba la dotación ejidal. De modo que en la actualidad existen comunidades agrarias de población no indígena y ejidos de población indígena (Merino, 2004).

El Plan Nacional Forestal (PNF) 2007-2012 establece que existen en el país 30,305 ejidos y comunidades agrarias que poseen en conjunto 105 millones de hectáreas de tierras con algún tipo de cubierta vegetal natural, es decir que aproximadamente 75% de la superficie con cubierta vegetal del país es propiedad de ejidos y comunidades. Con base en la información de la misma fuente el PNF indica que del total de ejidos y comunidades existentes en México, 8,928 poseen superficies cubiertas por bosques o selvas que suman alrededor de 17.5 millones de hectáreas; es decir, de la superficie total de bosques y selvas (65.6 millones de ha.), 26.7% se encuentra bajo régimen de propiedad social (Merino, 2004).

1.3. El Carbono, el ciclo del carbono y su importancia en los ecosistemas forestales

Es importante conocer la función de los bosques y los servicios ambientales que realizan, la captura de carbono es importante ya que es de las funciones más importantes que realizan las masas forestales para mitigar los efectos de cambio climático al capturar carbono y liberar oxígeno.

1.3.1. El carbono

En la naturaleza el carbono se encuentra en todas partes: en el agua bajo la forma de compuestos carbónicos disueltos (los carbonatos), en el aire como dióxido de carbono, en el suelo también como carbonatos, forma parte de la estructura de todos los organismos vivos, etc. Todos los organismos vivos están constituidos por compuestos de carbono, que obtienen como resultado de sus procesos metabólicos realizados durante su crecimiento y desarrollo, y que son liberados cuando éstos mueren. Aproximadamente, el 50% del peso seco de las plantas lo constituye este elemento, por lo que es uno de los más importantes para vida (Smith et al., 1993).

1.3.2. Fijación de dióxido de carbono

De acuerdo con Montoya (1995), toda la vegetación asimila CO₂ atmosférico, por medio del proceso fotosintético, al formar carbohidratos y ganar volumen. Los árboles en particular, asimilan y almacenan grandes cantidades de carbono durante toda su vida. Los bosques del mundo capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% de flujo anual de carbono de la atmósfera y de la superficie de la tierra. Por ello, la actividad forestal puede compensar las crecientes emisiones de CO₂ en dos formas:

- a) Al crecer nuevos reservorios de dióxido de carbono, incrementando la masa de material maderable tanto por medio del crecimiento de árboles como por la extracción de madera. Para lograr mayor efectividad en el proceso de almacenamiento de carbono en el largo plazo, la madera extraída debería convertirse en productos de larga duración como los muebles de madera.

Una vez que el árbol ha alcanzado su madurez, el carbono acumulado se mantendrá almacenado, pero el área muy pronto actuará como reservorio, debido a que el proceso de respiración y oxidación en un bosque maduro generalmente alcanza un balance por el efecto fotosintético. En el largo plazo, el carbono capturado tanto en sistemas forestales como en sistemas agroforestales puede alcanzar entre 80 y 350 t C ha⁻¹.

- b) Protección de los bosques y suelos naturales que almacenan carbono, cuando se destruye el bosque, entre 50 y 400 t C ha⁻¹ pueden ser liberadas a la atmósfera. Y al conservar los almacenes de carbono puede ser un camino válido para mitigar la emisión. En este contexto, los procesos de almacenamiento son válidos si los bosques se mantienen a largo plazo. Mientras que la protección de un área forestal puede inducir la presión en otra, se requieren esquemas integrados de manejo de recursos, enriquecidos con esquemas de evaluación de proyectos para validar dicha protección.

1.3.3. El ciclo del carbono

García (2011), describe el ciclo del carbono como el sistema de las transformaciones químicas de compuestos que contienen carbono en los intercambios entre biosfera, atmósfera, hidrosfera y litosfera. Es un ciclo biogeoquímico de gran importancia para la regulación del clima de la Tierra, y en él se ven implicadas actividades básicas para el sostenimiento de la vida.

El carbono es un componente esencial para los vegetales y animales porque forma parte de compuestos como: la glucosa, carbohidratos importantes para la realización de procesos en la respiración, también interviene en la fotosíntesis bajo la forma de CO₂ (dióxido de carbono) tal como se encuentra en la atmósfera. La reserva fundamental de carbono, en moléculas de CO₂ que los seres vivos puedan asimilar, es la atmósfera y la hidrosfera. Este gas está en la atmósfera en una concentración de más del 0,03% y cada año aproximadamente un 5% de estas

reservas de CO₂ se consumen en los procesos de fotosíntesis, es decir que todo el anhídrido carbónico se renueva en la atmósfera cada 20 años (García, 2011).

Por otra parte Ordoñez (1999) menciona que el ciclo del carbono, comienza con la fijación del anhídrido carbónico atmosférico a través de los procesos de la fotosíntesis, realizada por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, el anhídrido carbónico y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno en forma simultánea, que pasa a la atmósfera. Parte del carbohidrato se consume directamente para suministrar energía a la planta, y el anhídrido carbónico así formado se libera a través de sus hojas o de sus raíces. Otra parte es consumida por los animales, que también respiran y liberan anhídrido carbónico. Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por microorganismos del suelo, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en anhídrido carbónico y regrese a la atmósfera.

La incorporación de carbono al ciclo biológico se da por medio de la fotosíntesis, la cual produce energía bioquímica para los procesos fisiológicos y de formación de biomasa a partir de CO₂, energía radiante y nutrimento CO₂, es tomado directamente de la atmósfera y su asimilación por la planta es conocida como fotosíntesis gruesa. Pero no todo el CO₂, asimilado es transformado a biomasa, sino que una parte es regresado a la atmósfera por medio de la respiración, para el mantenimiento de los procesos fisiológicos. A la fotosíntesis gruesa después de la respiración, se le conoce como fotosíntesis neta, que representa la cantidad neta de carbono que entra al ciclo biológico. La tasa neta de fotosíntesis depende de las características fisiológicas de las especies que la realizan y de la disponibilidad de los otros recursos necesarios para llevarla a (figura 2) (Oliva y García, 1998).

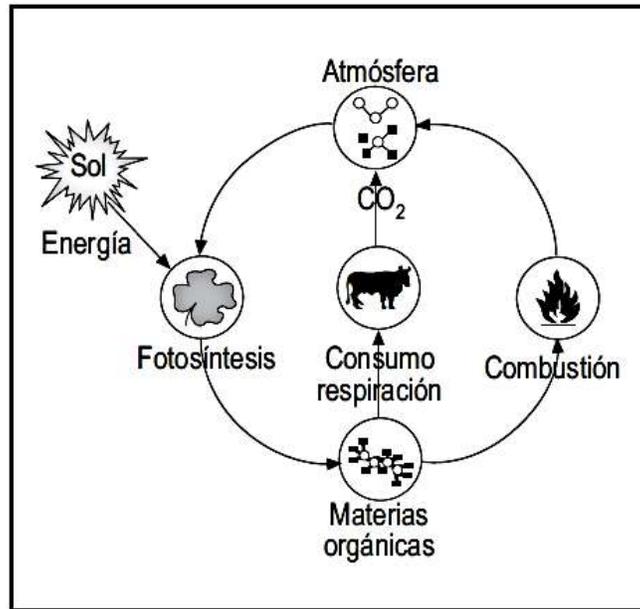


Figura 2: ciclo del carbono (Ordoñez, 1999)

1.3.4. El carbono en ecosistemas forestales

De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2007), donde se menciona que el CO_2 atmosférico es incorporado a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis. Este CO_2 participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco). Al crecer, éste incrementa su follaje, ramas, flores, frutos y yemas de crecimiento (que en su conjunto conforman la copa) así como su altura y el grosor de su tronco. La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas, lo que da lugar a que las copas de los árboles compitan por esta energía. Esto origina, a su vez, un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable, éste, a su vez, aporta nuevamente CO_2 al entorno.

Oliva & García (1998) describen que la incorporación de Carbono al suelo en los ecosistemas naturales es por dos vías principales: por el mantillo (capa superficial de material vegetal) y por la biomasa radicular. La velocidad de la descomposición

de este material depende de las poblaciones microbianas del suelo y de las características del material vegetal.

Las características principales que determinan la descomposición del mantillo son:

- 1) La complejidad de las moléculas orgánicas que forman el material vegetal, que está muy relacionado con la energía necesaria que requieren las poblaciones microbianas para su descomposición;
- 2) La forma de las uniones bioquímicas que tienen estas moléculas
- 3) Su contenido de nutrientes.

En la Figura 3 se representan los flujos y almacenes de carbono en un ecosistema forestal donde se aprecia; el follaje, ramas, tronco, raíces, desechos de materia orgánica y el humus, reincorporándose al ciclo del carbono (Modificado de Nabuurs y Morhen, 1993).

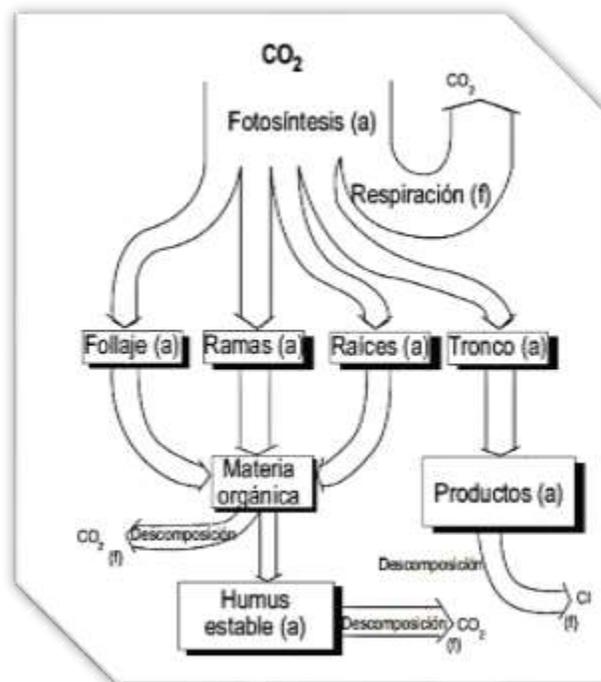


Figura 3: Flujo y almacenes de carbono en un ecosistema forestal (modificado de Narbuus y Morhen, 1993).

1.4. Biomasa aérea

1.4.1. Biomasa

La biomasa forestal es la materia orgánica obtenida de la producción primaria a través de la fotosíntesis menos el consumo mediante de la respiración y la cosecha (FAO, 2012). Incluye el peso de la materia orgánica por encima y por debajo del suelo de un ecosistema forestal; su estimación se compone de la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta. Se expresa en términos de peso verde o de peso seco libre de cenizas (peso orgánico) (BUN-CA, 2002).

Otra definición de biomasa es la que mencionan Gómez y Vergara (2010) como la materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal, tanto por encima como por debajo del suelo.

La biomasa forestal se puede clasificar en:

Natural: Es la que se produce en la naturaleza sin ninguna intervención humana, y que se puede aprovechar como fuente energética. Como por ejemplo los troncos, hojas, ramas, frutos, etc.

Residual Seca: Son los residuos que se generan en las actividades forestales o en la industria maderera y que todavía pueden ser utilizados y considerados subproductos. Como ejemplo se puede considerar al aserrín, la cáscara de almendra, las podas de frutales, etc. (Gómez y Vergara, 2010)

1.4.2. Importancia de la biomasa

El estudio de la biomasa es importante por muchas razones entre las que se puede mencionar las siguientes, constituye la materia prima de los alimentos, fibras y combustible, así mismo, es preponderante para el manejo de agua, suelo y fuego, la biomasa está relacionada con la estructura de la vegetación, ya que su cambio influye en la biodiversidad, y está determinada por la magnitud y tasa de la respiración autotrófica (Houghton *et al.* 2009). La biomasa se considera una unidad

de medida de la productividad de un ecosistema, del potencial energético y de la función de los bosques en el ciclo del carbono (FAO, 2012).

De acuerdo con Schimel *et al.*, (1995) la biomasa de plantas y la materia orgánica del suelo contiene cerca de 2200 Gt de carbono a una profundidad de 2m, dos veces más que la cantidad que se encuentra en la atmosfera, los flujos de carbono entre el sistema de vegetación-suelo y la atmosfera son 10 veces más grande que las emisiones de CO₂ de combustibles fósiles (Figura 4).

En la Figura 4 (Houghton *et al.* 2009), se presenta el promedio de biomasa viva y total de los principales ecosistemas terrestres del mundo.

Tipo de ecosistema	Área (10 ⁶ ha)	Total de biomasa (Pg)	Promedio de la densidad de biomasa (Mg·ha ⁻¹)
Bosques tropicales	1750, 1850	680, 350	390, 190
Bosques templados	1040	280	270
Bosques boreales	1370	110	83
Bosques templados+bosques boreales	2410, 2450	390, 185	160, 75
Tundra ártica	560	4	7
Terrenos con arbustos mediterráneos	280	34	120
Terrenos de cultivo	1350	8	6
Sabanas y pastizales tropicales	2760	160	57
Pastizales tropicales	1500	12	8
Desierto	2770	20	7
Hielo	1550	0	0
Total	14930, 15070	1300, 733	87,51

Figura 4: Biomasa viva y total de los principales ecosistemas terrestres (Houghton *et al.*, 2009).

1.4.3. Determinación de Biomasa aérea

La biomasa aérea del bosque es un indicador para determinar el estado de conservación de los bosques y su valor económico (Gasparri *et al.*, 2007). La biometría en el terreno implica procedimientos de muestreo destructivo con costos elevados y a veces impráctico, por ello es común estimarlo mediante muestreos de inventarios forestales a través ecuaciones alométricas. La biomasa responde a patrones físicos, biológicos y de manejo como: región geográfica, calidad de sitio, elevación, exposición, pendiente, clima, cambios estacionales, especie, variación genética, edad, fertilización, densidad del rodal, sistema silvícola aplicado, contaminación atmosférica y entre otros (Garcidueñas, 1987; Gasparri *et al.*, 2007).

La biomasa de los diferentes componentes arbóreos aumenta a través del tiempo, su concentración aérea se dispone de la siguiente manera: el fuste principal concentra entre 55 y 70% del total del árbol, las ramas de 5 al 37%, el follaje de 1 al 15% y la corteza de 5 al 16% (Pardé, 1980).

En la Figura 5 se observan los componentes de la producción primaria aérea de un bosque.

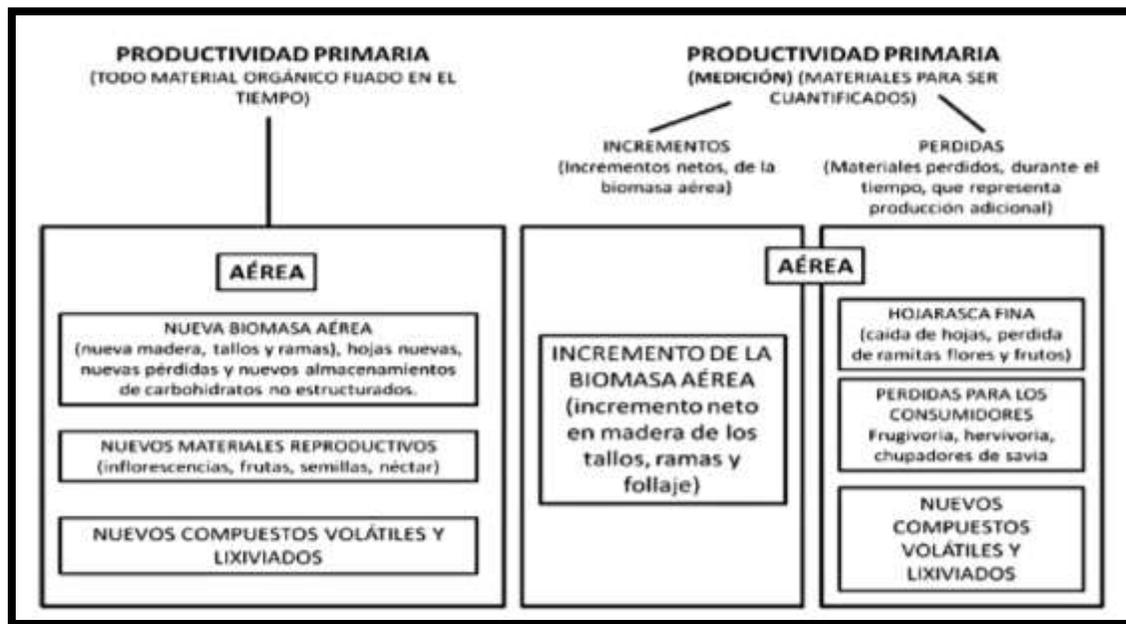


Figura 5: Componentes de la producción aérea de un bosque, Adaptado de (Clark *et al.*, 2001).

1.5. Cambio climático, efectos de cambio climático y la variabilidad del clima en las masas forestales

Los efectos del cambio climático y la variabilidad del clima en las masas forestales son evidentes en todo el mundo y sus impactos son inevitables. Los desafíos que presenta el cambio climático requieren de ajustes en las políticas forestales y cambios en los planes y las prácticas de manejo forestal, puesto que los ecosistemas son reservorios de diversidad biológica terrestre más grande del mundo. Así como son fundamentales en la adaptación y mitigación del cambio climático mundial, ya que son grandes reservorios de carbono (FAO, 2012; 2013).

1.5.1. El cambio climático

El cambio climático no se refiere únicamente a variaciones del clima. No son cambios de temperatura en los que aumenta o disminuye el calor o el frío en un tiempo determinado; se trata más bien de un proceso de calentamiento de la tierra (INEC, 2006) que consiste en que gradualmente la temperatura de la tierra va aumentando paulatinamente, debido al aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, de acuerdo con el IPCC (2014), estos cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos.

El cambio climático global está provocando, entre otras cosas, la intensificación de la variabilidad climática natural. Los fenómenos hidrometeorológicos extremos dañan los bienes y la integridad física de las personas, en una cadena compleja de impactos que afectan prácticamente a todas las dimensiones del desarrollo humano. La forma en que se prepara la sociedad frente a condiciones extremas del clima como las ondas de calor, las lluvias intensas, o las sequías prolongadas; es un elemento determinante de la vulnerabilidad de los países en el futuro (Landa, 2008).

El IPCC (2002) menciona que se espera que la temperatura media de la superficie del planeta aumente en entre 1,4° y 5,8° en el periodo comprendido entre los años de 1990 al 2100, y que las áreas terrestres vayan a sufrir un calentamiento mayor que la media mundial.

De acuerdo con Barros (2005), la temperatura global en la superficie de la tierra aumentó de 0.6°C en los últimos 150 años. Ambos hemisferios, norte y sur muestran las mismas tendencias y fluctuaciones. Al mismo tiempo, hay toda una serie de indicadores climáticos consistentes con esa tendencia.

1.5.2. Causas y efectos del cambio climático

Las investigaciones científicas han llegado a la conclusión de que las actividades humanas alteran de manera directa o indirecta la composición de la atmosfera que agregadas a la variabilidad climática natural han provocado que el clima a nivel global se vea alterado significativamente en este siglo (Santiago *et al.* 2008).

La evolución del clima a lo largo de periodos más o menos largo de años depende de la suma de los efectos naturales y de los derivados de la actividad humana, o antropogénicos, y especialmente los denominados gases de efecto invernadero (Useros, 2012).

1.5.2.1. Causas naturales de Cambio Climático

Desde su origen, el planeta ha estado en permanente cambio. Así lo evidencian, por ejemplo, las denominadas eras geológicas, con profundas transformaciones en la conformación del planeta, y la evolución de las especies desde que la vida apareció en la Tierra (Rodríguez y Mance 2009), de acuerdo con Ayllón (2003) otros testimonios de cambio climático ha sido las glaciaciones por las que ha atravesado el planeta, en cuyos periodos interglaciares, se elevó el nivel del mar hasta 3m y la temperatura por arriba de los 2 o 3 °C de la media actual.

Según Hopkin (2005) citado por Mendoza 2011 los fenómenos naturales más importantes que han tenido relación con los cambios en el clima son los siguientes:

- El incremento de las manchas solares en ciclos de once años de duración, el cual se relaciona con periodos de temperaturas cálidas y su ausencia, con largas épocas gélidas.
- Los cambios en la posición de la tierra y movimientos periódicos con respecto al sol como la nutación y la precesión cuya combinación hace variar sensiblemente la calidad de radiación solar recibida por la tierra y su distribución superficial.
- La influencia de la luna como regulador climático de la tierra. La inclinación del eje respecto a la eclíptica, es muy estable, con variaciones de 2.3°, lo que se debe a la influencia gravitatoria que ejerce la luna sobre el planeta.
- La actividad volcánica, la cual produce polvo y cenizas que al quedar suspendidas en el aire, actúan como un escudo que bloquea parte de la radiación solar y causan un posible enfriamiento en la superficie terrestre.
- El fenómeno El Niño/Oscilación del sur (ENOS) que consiste en un cambio en los patrones de movimientos de las masas de aire, provocando, en consecuencia, un retardo en la cinética de las corrientes marinas normales. Desencadena el calentamiento de las aguas sudamericanas y provoca estragos a escala mundial. El niño es uno de los fenómenos más importantes como modulador de las lluvias en México. Al fenómeno que produce condiciones inversas se le conoce con el nombre de la Niña (INE, 2004).

1.5.2.2. Cusas antropogénicas de Cambio Climático

Casi la mitad de la radiación solar que llega a nuestra atmósfera penetra la superficie de la tierra, mientras el resto es reflejado por la atmósfera misma y retornada al espacio o absorbido por gases y partículas de polvo. La energía solar que alcanza la superficie de la tierra calienta el suelo y los océanos, que, a su vez,

liberan calor en la forma de radiación infrarroja. Los gases de efecto invernadero (GEI) que se encuentran en la atmósfera, como el dióxido de carbono, absorben parte de esta radiación producida por la Tierra y la envían en todas las direcciones. El efecto neto de este fenómeno es el calentamiento de la superficie del planeta a la temperatura actual (Rodríguez y Mance 2009).

En la Figura 6 se observa un esquema del efecto invernadero, el cual es un fenómeno físico natural y muy importante para mantener la vida en la tierra, sin embargo al aumentar los gases de efecto invernadero, crean lo que se ha conocido en los últimos años como calentamiento global.

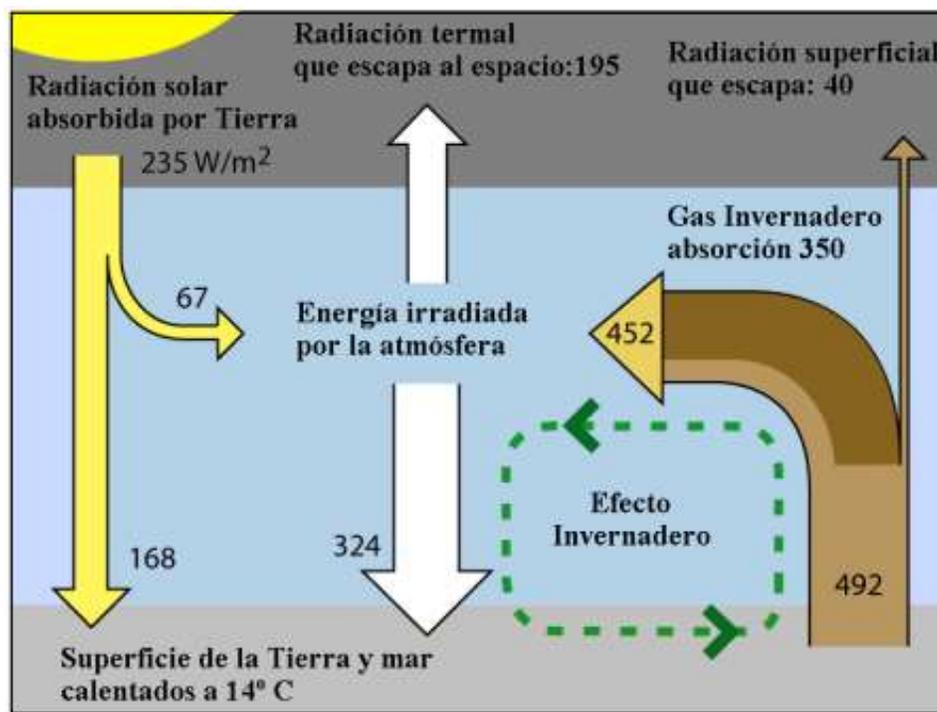


Figura 6: Esquema de calentamiento global (http://www.wikiwand.com/es/Efecto_invernadero).

En el mundo, la emisión de CO_2 se ha incrementado a la par del consumo de combustibles fósiles. Este incremento no ha sido pequeño: entre 1971 y el año 2005, la emisión mundial derivada del consumo de combustibles fósiles aumentó alrededor de 90%; en el 2008 se emitieron en el mundo 27 mil millones de toneladas de CO_2 (SEMARNAT, 2009).

México se encuentra entre los 70 países con mayores emisiones de GEI per cápita, ya que emite 0.96 toneladas anuales de carbono a la atmósfera. Esta cantidad, sin embargo, se encuentra muy por debajo de las emisiones de los países desarrollados; Estados Unidos, por ejemplo, emite 5.6 toneladas anuales (INE-SEMARNAP, 1997). En el caso de México, 30.5% de las emisiones de GEI están relacionadas con las actividades de cambio de uso del suelo, asociadas a su vez con procesos de deforestación (INE, 2004).

Desde hace más de 100 años se ha dado un proceso acelerado de pérdida de bosques y vegetación en grandes regiones de nuestro planeta. Por ejemplo, se calcula que México ha perdido por lo menos la mitad de sus bosques desde la época colonial hasta nuestros días. Según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), México ha talado 6.3 millones de hectáreas de sus bosques, ocupando el segundo lugar en América Latina en destrucción forestal ya que el primer lugar lo tiene Brasil (Conde, 2007). Un suelo desnudo refleja mayor cantidad de energía que cuando está cubierto de vegetación. Esto provoca que durante la noche se dé presencia de aire frío sobre la superficie terrestre más cercana al suelo y aire caliente en las capas superiores; esta inversión inhibe la conectividad (circulación del aire de abajo hacia arriba y viceversa) y con ello la formación de nubes y de lluvia, además de que encajona los contaminantes con graves consecuencias para la salud de la población (INE, 2004).

Algunas especies vegetales y animales podría adaptarse a las nuevas condiciones climáticas, incluso algunas de distribución restringida podrían ampliar su hábitat. Pero en general del 20 al 30% de la biodiversidad global estará en riesgo de extinción por la pérdida de hábitat. Por ejemplo, con un incremento de 2°C en temperatura y una disminución del 10% en la precipitación pluvial anual se estima que los tipos de vegetación más afectados en México serán los bosques de coníferas y encinos, seguidos del matorral xerófilo, el bosque mesófilo de montaña, la vegetación acuática y el pastizal; mientras que los tipos de vegetación que aumentarán su superficie respecto a la actual, son el bosque tropical perennifolio, el bosque tropical caducifolio y el bosque espinoso (INE, 2004).

1.5.3. Efectos del cambio climático

Hay que tomar en cuenta que el cambio climático afectará a la totalidad del planeta: a todos sus ecosistemas y a todas sus sociedades, incluyendo con más razón a las generaciones futuras. Por esta razón, las soluciones parciales únicamente suponen un alivio momentáneo para la crisis general (Pardo, 2007).

La vida de las distintas especies animales y vegetales sobre la tierra está condicionada por el permanente equilibrio entre factores muy diversos, entre los que juega un papel determinante el sistema climático. La influencia del clima, condicionante de las características básicas de los distintos ecosistemas que conforman nuestro planeta, sobre la especie humana, tanto desde el punto de vista cuantitativo, expresado en la evolución demográfica de la población, como cualitativo, manifestado en su contribución al mantenimiento y mejora de los niveles de salud, e incluso de la distribución geográfica de la población. La influencia del clima en las condiciones medioambientales, en el desarrollo socioeconómico de las poblaciones y su correspondiente crecimiento demográfico, en las migraciones forzosas por fenómenos climáticos extremos y los resultados mortalidad (Useros, 2012).

El cambio climático regional repercute sobre muchos sistemas naturales. De hecho, se observa; cada vez más, que la cantidad de hielo acumulado por millones de años en los polos, se están reduciendo, los sistemas hidrológicos y biológicos se están transformando por ejemplo; las migraciones empiezan más pronto y el área de la distribución geográfica de ciertas especies se está desplazando hacia los polos. A escala regional, se están empezando a evidenciar algunos impactos del cambio climático que no se habían previsto hasta ahora. Por ejemplo, el deshielo de los glaciales puede con las inundaciones costeras (IPCC, 2007).

1.5.3.1. El efecto social del cambio climático

La vulnerabilidad climática se da en función del carácter magnitud, y velocidad de la variación climática a la que se encuentra expuesto el sistema, así como de la sensibilidad y capacidad de adaptación. El concepto de análisis de vulnerabilidad

es aceptado por la comunidad científica como un mecanismo para guiar el análisis normativo de acciones que conduzca al bienestar de las personas mediante la reducción del riesgo (INECC, 2012).

El Cambio Climático provocará impactos directos e indirectos sobre la salud. Los impactos directos están relacionados con las sequías, tormentas e inundaciones, olas de calor y de frío, más fuertes y prolongadas. Más calor pone en riesgo a los más vulnerables, como son los ancianos y los niños, a especies más sensibles tanto vegetales como animales. Los impactos indirectos están relacionados con la expansión de los vectores o mosquitos de zonas tropicales, incluso a ciertas partes de montaña generalmente más frescas, que pueden resultar en más brotes de dengue y el paludismo, o de enfermedades relacionadas con la falta de agua potable, como el cólera, la diarrea y la tifoidea (INECC, 2006). Según las circunstancias, existen muchos más aspectos que hay que tener en cuenta, entre los que están la diseminación de enfermedades infecciosas. La Organización Mundial de la Salud estima que los factores climáticos son responsables del 2,4% de los casos de diarrea que se producen en el mundo, y del 2% de los casos de malaria, el aumento del cáncer de piel de (15 al 20% en poblaciones de piel fina; cataratas y otras lesiones oculares pueden aumentar del 0,6 al 0,8% por cada 1% de disminución del ozono y un aumento de la vulnerabilidad en algunas enfermedades infecciosas como resultado de la supresión de la inmunidad causada por la radiación UVB); problemas respiratorios; desnutrición que puede incrementar (de 5 hasta el10% en las personas de escasos recursos, sobre todo en los trópicos (Pardo, 2007).

1.5.3.2. Los efectos del cambio climático sobre los recursos naturales

México es uno de los cuatro países con mayor diversidad biológica en el mundo y cuenta con 10 y 12% de la diversidad conocida. El conjunto de los 17 países mega diversos albergan entre 60 y 70% de la diversidad del planeta. Esto conlleva una gran responsabilidad, pues aunque se sabe de una gran cantidad de especies endémicas, también se tiene evidencia de un aumento considerable de presiones

antropogénicas, principalmente relacionadas con las elevadas tasas de cambio de uso de suelo, modificación y deterioro, reemplazo o erradicación de hábitats, y esquema de aprovechamientos no sustentable de los recursos naturales, que están conduciendo a una pérdida irreversible de especies o sus poblaciones y a la transformación o sustitución de los ecosistemas (INECC, 2012).

Los cambios en los niveles de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre y los cambios climáticos previstos pueden tener efectos tanto positivos como negativos en las plantas,

Los efectos negativos sobre las plantas según la FAO (1990):

- Temperaturas diurnas altas, incluso por pocas horas, pueden causar la esterilidad del polen en algunos cultivos como el arroz y trigo.
- En algunas regiones, un aumento de la cubierta de nubes y de las precipitaciones podría resultar en una reducción de la producción de cosechas en muchos cultivos.
- Se prevé que las zonas actualmente caracterizadas por un clima templado, inviernos lluviosos y veranos calientes y secos, se volverá árido, lo que causará una reducción de la humedad del suelo, especialmente en los periodos de crecimiento de las plantas. Esto dará lugar a una menor productividad de los cultivos, menor índice de crecimiento de los bosques y un aumento del peligro de los incendios.
- Las mismas condiciones que producirá un aumento de la productividad de los cultivos, favorecerán también a las malezas, que harán mayor competencia a los cultivos.
- El aumento de la temperatura provoca que las plagas y enfermedades aumenten y se difundan, incluso podrían surgir nuevas especies de estas con la posibilidad de surgir nuevas enfermedades. La supervivencia de las especies adaptadas a los rigores de invierno podría ser mayor, mientras que los ciclos reproductivos podrían ser más cortos, con el consiguiente aumento de la frecuencia y de la intensidad de las epidemias.

- Las zonas donde crecen ciertos cultivos y especies de árboles pueden cambiar.

Por otro lado, las temperaturas cambiantes pueden alterar el índice de la actividad microbiológica en los suelos. Si las temperaturas aumentan, el índice de la actividad microbiológica aumentará proporcionalmente, a lo que a su vez acelerará la velocidad de emisión de CO₂. Se calcula que la cantidad de carbono almacenado en los suelos es casi el doble de la atmosfera. Por consiguiente, se puede prever que un pequeño aumento en el índice de la actividad microbiológica contribuirá considerablemente a aumentar la cantidad de CO₂ atmosférico (Ciesta, 1996).

La descomposición de materia orgánica en los suelos tiene como consecuencia la emisión de nitrógeno, haciéndolo disponible para el crecimiento de las plantas. Se prevé también que el índice de erosión química del suelo mineral aumente a mayores temperaturas, haciendo que hayan más nutrientes disponibles para el crecimiento de las plantas, contribuyendo a acelerar el crecimiento de las plantas (Grace, 1991).

1.5.3.3. Los efectos del cambio climático sobre las masas forestales

El cambio climático y los bosques están íntimamente ligados. Por una parte, los cambios que se producen en el clima mundial están afectando a los bosques debido a que las temperaturas medias anuales son más elevadas, a la modificación de las pautas pluviales y a la presencia cada vez más frecuente de fenómenos climáticos extremos (FAO, 2006).

1.5.4. Los bosques y el cambio climático

Los bosques son fundamentales para el bienestar del planeta: cubren el 30% de la superficie terrestre y se estima que en ellos vive entre el 50 y el 90% de todas las especies del planeta. Alrededor del 20% de la población mundial (1.600 millones de personas) depende de ellos para su supervivencia (GFC, 2009).

Es por ello que Ímaz (2014), menciona que los bosques son relevantes para mitigar el cambio climático por que la deforestación y la degradación de los mismos representan, en el nivel global, entre el 15 y 20% de las emisiones de CO₂ a la atmosfera. Se argumenta que mantener y regenerar la cubierta forestal puede contribuir a la captura de gases de efecto invernadero (GEI), promover el desarrollo socioeconómico y conservar la biodiversidad. Sin embargo, para avanzar en la instrumentación de políticas y acciones encaminadas a estos fines, es necesario analizar los procesos sociales de significación, apropiación y transformación de la naturaleza (Ímaz, 2014).

En su crecimiento, los árboles absorben el dióxido de carbono de la atmósfera y lo convierten, a través de la fotosíntesis, en carbono que "almacenan" en su tronco, raíces, hojas y otros tejidos vegetales. Adicionalmente, también queda carbono almacenado en el suelo y en la materia orgánica al ras del suelo. Sin embargo, cuando son destruidos por el cambio de uso de suelo, por la explotación excesiva o por el incremento en la frecuencia y severidad de los incendios, el carbono almacenado es liberado nuevamente hacia la atmósfera contribuyendo a agravar el problema del cambio climático (CONAFOR, 2011).

Detener la deforestación es de vital importancia para las comunidades dependientes del bosque y para la biodiversidad, (GFC, 2009) con ella se provoca el 17% de las emisiones de carbono en el mundo, una cantidad casi igual a todo el dióxido de carbono que genera el transporte mundial. Es por eso que no es posible vencer la lucha contra el cambio climático sin tener en cuenta a los bosques del mundo (CONAFOR, 2011). Pero también es crítico lograrlo si queremos tener alguna esperanza de frenar el cambio climático (GFC, 2009).

México es uno de los diez países con mayor área de bosques primarios. La superficie forestal del país abarca alrededor de 139 millones de hectáreas, de las cuales 60% son bosques y selvas. En México la deforestación y la degradación de los bosques generan emisiones que representan alrededor del 9% de las emisiones

totales de carbono emitidas por el país. Estas emisiones podrían evitarse si se eliminan las causas de la deforestación y la degradación forestal. Al mismo tiempo, existe un potencial importante para promover que los bosques almacenen aún más carbono a partir de su conservación, su manejo adecuado y acciones de recuperación tales como la reforestación (CONAFOR, 2011).

1.5.5. Acciones de mitigación de cambio climático

Las estrategias de mitigación en el sector forestal están centradas en impulsar el manejo sustentable de los bosques como principal herramienta para combatir las causas del cambio climático, las actividades de mitigación consisten en: a) disminuir la deforestación y la degradación, y b) aumentar los acervos de carbono a través de actividades de restauración y reforestación (CONAFOR, 2013).

La FAO menciona en su informe sobre; la gestión de los bosques ante el cambio climático (2010), que la gestión forestal sostenible también contribuye a la seguridad alimentaria, la reducción de la pobreza, el desarrollo económico y el uso racional del territorio. Una buena gestión de los bosques asegura la supervivencia de los ecosistemas forestales y mejora sus funciones medioambientales, socioculturales y económicas. También puede aumentar al máximo la contribución de los bosques a la mitigación del cambio climático, así como ayudar a los bosques y a las poblaciones que dependen de ellos a adaptarse a las nuevas condiciones originadas por el cambio climático.

1.5.5.1. Principales acciones de mitigación de cambio climático

La CONAFOR (2013) menciona que las principales acciones de mitigación del cambio climático son disminuir la deforestación y la degradación, de acuerdo con la GFC (2009) Los bosques generan lluvias; el agua del suelo sube por los árboles (en un proceso conocido como transpiración), transpira por las hojas y llega a la atmósfera, donde forma las nubes que al condensarse cae de nuevo a la tierra en

forma de lluvia. Así, es probable que la destrucción de los bosques provoque cambios significativos en el tiempo y el clima. La deforestación también tiene un impacto sobre los ecosistemas y la producción de alimentos, que dependen de la lluvia.

Otra de las principales acciones que menciona CONAFOR (2013) es la de aumentar los reservorios de carbono a través de actividades de restauración y reforestación. Este proceso consiste en realizar actividades de plantación de árboles en zonas recientemente deforestadas menor a 50 años, y la forestación propiamente dicha, lo que indica es realizar una actividad de plantación de árboles en zonas desprovistas de cubierta vegetal durante mucho tiempo (más de 50 años) (IPCC, 1996).

1.5.6. Potencial de servicios ambientales que proporciona el bosque

Los servicios ambientales de los bosques son la relación social con el bosque y los servicios que éste ofrece han experimentado modificaciones a lo largo de la historia. La incorporación de los nuevos conceptos de valor total a los bosques y la ampliación de su marco de interés desde las ciencias forestales hacia otros agentes sociales y otras disciplinas del conocimiento han abierto la puerta a una apreciación renovada de los servicios ofrecidos por los ecosistemas forestales. Se intentan desarrollar mecanismos que permitan captar parte de este valor como estrategia para conservar y gestionar los bosques de un modo sostenible (Ruiz, Pérez y Sayer, 2007).

1.5.7. Pago por servicios ambientales

Mayrand & Paquin (2004), mencionan que el pago por servicios ambientales es una forma de buscar el apoyo para el beneficio por medio de la transferencia de recursos económicos hacia quienes proveen dichos servicios o son beneficiados de los recursos ambientales.

SEMARNAT (2009) describe que el pago por servicios ambientales fue diseñado para proveer incentivos económicos a los dueños de terrenos forestales (ejidos, comunidades y pequeños propietarios) para apoyar las prácticas de conservación y evitar el cambio de uso del suelo o deforestación de los bosques. Balvera y Cotler (2009), señalan que los servicios ambientales (en algunos casos también llamados servicios ecosistémicos) pueden definirse como aquellos beneficios que los seres humanos obtenemos de los ecosistemas, ya sea en forma natural o mediante un manejo sustentable, de acuerdo a la evaluación de los ecosistemas del Milenio (*Millenium Ecosystem Assessment* [MEA], 2005), los servicios ambientales pueden clasificarse en cuatro tipos:

- Provisión; Bienes tangibles, alimentos, madera, fibras.
- Regulación; Referida a procesos, regulación climática, control de la erosión.
- Culturales; Bienes intangibles, asociado a valores estéticos o religiosos.
- Soporte; Base de los anteriores, productividad primaria y conservación de la biodiversidad.

Algunos ejemplos de servicios ambientales son: regulación climática, purificación del agua, conformación del suelo, el paisaje (en términos de un valor estético, cultural o educativo) y la protección contra eventos como huracanes y tormentas, entre otros; todos ellos relacionados con el bienestar, y algunos vinculados con un valor económico, ya sea vía la venta de productos, o el

aumento de los costos por la pérdida del servicio *Millenium Ecosystem Assessment* [MEA], 2005).

De acuerdo con IICA (2012) los esquemas de pago por servicios ambientales son una alternativa para las comunidades y ejidos ya que les permite:

- El establecimiento de una actividad económica complementaria a otras opciones de ingreso.
- Incorporar a los terrenos de la zona de uso común.
- La generación de acuerdos de largo plazo en torno a decisiones sobre el uso del territorio del núcleo agrario.
- Dar cauce a las atribuciones legales del ejido o comunidad en torno a actividades que generan beneficios sociales (internos externos).

De acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP 2017), el pago por servicios ambientales en México ha sido un esfuerzo llevado a cabo por la CONAFOR y diversos socios importantes como la CONANP. Este programa, tiene como finalidad impulsar el reconocimiento del valor de los servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas forestales, agroforestales y recursos naturales, además de apoyar la creación de mercados de estos servicios. Estos programas apoyan a comunidades, ejidos, Asociaciones Regionales de Silvicultores y a propietarios de terrenos forestales.

Los conceptos de apoyo se agrupan en cinco categorías siendo:

- Hidrológicos
- Biodiversidad
- Sistemas agroforestales
- Captura de carbono
- Elaboración de proyectos.

1.6. Percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis espacial.

1.6.1 Percepción remota

Se define a la percepción remota como la ciencia y el arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto (Martínez, 2015)

Chuvienco (1996), define la teledetección como una técnica por medio de la cual se obtiene información útil de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis e interpretación de datos de imágenes adquiridas por un equipo que no está en contacto físico con el objeto, área o fenómeno bajo investigación.

La Teledetección espacial es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre o marina y la atmósfera desde sensores instalados en plataformas espaciales. Por ser una técnica que no está en contacto directo con el objeto requiere que entre el sensor y el objeto haya un flujo de información, el cual es conocido como radiación electromagnética la cual puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo y haber sido reflejada por este. Todos los cuerpos u objetos (seres vivos, planetas u objetos inanimados) emiten radiación electromagnética. La cantidad y tipo de radiación que emiten depende básicamente de su temperatura. El mayor emisor de esta radiación en el sistema solar es el Sol, y la radiación que refleja la Tierra y los objetos situados en ella es la que se utiliza comúnmente en Teledetección. Otro tipo de emisión puede provenir del mismo sensor, el cual incorpora en su sistema un rayo emisor de radiación (Chuvienco, 1996).

La percepción remota es una herramienta indispensable y de gran ayuda en los estudios de medición de biomasa aérea, que facilita realizar la planificación en la toma de decisiones a favor de las comunidades y/o ejidos forestales.

1.6.1.1 Imágenes de satélite

De acuerdo con el Centro de Investigaciones Geoespaciales (2002), Es importante distinguir la diferencia entre imágenes y fotografías en percepción remota. Una imagen es cualquier representación gráfica, sin importar cuales métodos de percepción remota se utilicen para detectar y registrar la energía electromagnética.

La energía electromagnética puede ser captada de manera fotográfica o electrónica, las fotografías son el resultado de reacciones químicas producidas en la superficie de una película sensible a la luz para detectar y registrar las variaciones en energía. Por esto, se dice que una fotografía constituye un tipo específico de imagen que ha sido detectada y plasmada en una película fotográfica (Centro de Investigaciones Geoespaciales, 2002).

A diferencia de las fotografías, las imágenes satelitales registran la energía electromagnética de manera electrónica desde el inicio. Estas imágenes están conformadas por píxeles, cada pixel correspondiente al terreno mediante un valor numérico o número digital. El conjunto de píxeles forman una malla o raster (Centro de Investigaciones Geoespaciales, 2002).

Mora (2007), menciona que hay diferentes sensores, los sensores pasivos y los sensores activos y cada uno de ellos se pueden clasificar dependiendo del origen de la señal captada, los Sensores Pasivos se basan en la detección de las características reflectantes del sistema observado (objeto), es decir el sensor cumple la función de registrar la radiación emitida por el sistema observado o la radiación solar reflejada. Los métodos activos son aquellos en los que el sensor cumple una doble función ya que actúa activamente produciendo una señal (onda electromagnética) de características conocidas que posteriormente registrara después de interactuar con el sistema observado.

Una ventaja de los sensores pasivos es que trabajan en todo el rango espectral y los activos solo trabajan en la región de las microondas. Sin embargo, los segundos atraviesan las nubes y no dependen de la luz solar para capturar la información (Mora, 2007).

De acuerdo con la SEMAR (2009), la resolución de un sensor es su habilidad para registrar información en detalle de las distintas cubiertas. La resolución depende de la capacidad de los sensores para distinguir variaciones de la energía electromagnética, del detalle espacial que captura y del número y ancho de las bandas que alberga y las define de la siguiente manera.

Resolución espacial

Es el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen. Define el tamaño del píxel, que es la distancia correspondiente al tamaño de la mínima unidad de información en la imagen. La resolución espacial está relacionada con la escala de trabajo y la fiabilidad de la información (SEMAR 2009).

Resolución espectral

Es el número y el ancho de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Los satélites pueden clasificarse como monoespectrales para caso de los radares que presenta solo una banda, multiespectrales de 2 a varias bandas y hiperespectrales capaces obtener información simultánea de cientos de bandas (SEMAR 2009).

Resolución radiométrica

Es la sensibilidad del sensor, es decir, la capacidad para detectar variaciones en la radiación espectral que recibe. Determina el número de niveles de gris recogidos en el film, se expresa en niveles por píxel. A mayor resolución radiométrica, mejor interpretación de la imagen. El píxel mixto es definido por una señal intermedia a las cubiertas que lo componen (SEMAR 2009).

Resolución temporal

Es la periodicidad con que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. Está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación) y del diseño del sensor (ángulo de observación y ángulo de cobertura). El ciclo de recubrimiento es el tiempo que tarda el sensor en pasar sobre la misma porción de la Tierra, el periodo orbital es el tiempo que él tarda en circundar la tierra (SEMAR 2009).

1.6.2. Sistemas de información geográfica

De acuerdo con el INEGI (2014) los Sistemas de Información Geográfica (SIG), pueden definirse de la siguiente manera:

- Conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real.
- Datos.

Conjunto de mapas, de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas.

Resulta posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas, para obtener un mejor conocimiento de esa zona.

De la misma manera el INEGI (2014), menciona que los objetivos de los SIG son los siguientes:

1. Almacenamiento, manejo y manipulación de grandes volúmenes de datos espacialmente referenciados.
2. Proveer los medios para llevar a cabo análisis que implican, de manera específica, el componente de posición geográfica.
3. Organización y administración de los datos, de tal forma que la información sea fácilmente accesible a los usuarios.
4. Vinculación de diversas bases de datos

1.6.2.1. Componentes de los SIG

En la tabla 3, se pueden observar los componentes de los SIG y en la figura 7 se observa el ciclo de un SIG.

Tabla 3: Componentes de un SIG.

Personal	Capacitado en los temas de aplicación y en el manejo de las herramientas de SIG.
Organización	Estructura funcional y organización del personal para la ejecución de actividades.
Información geográfica	Ubicada espacialmente, actualizada, completa y útil para las aplicaciones.
Normas, procedimientos y metodologías	Con suficiente detalle y probadas
Programas de computo	De acuerdo a los tres puntos anteriores.
Equipo	Además de lo anterior, según el volumen de datos.

Fuente: INEGI (2014).

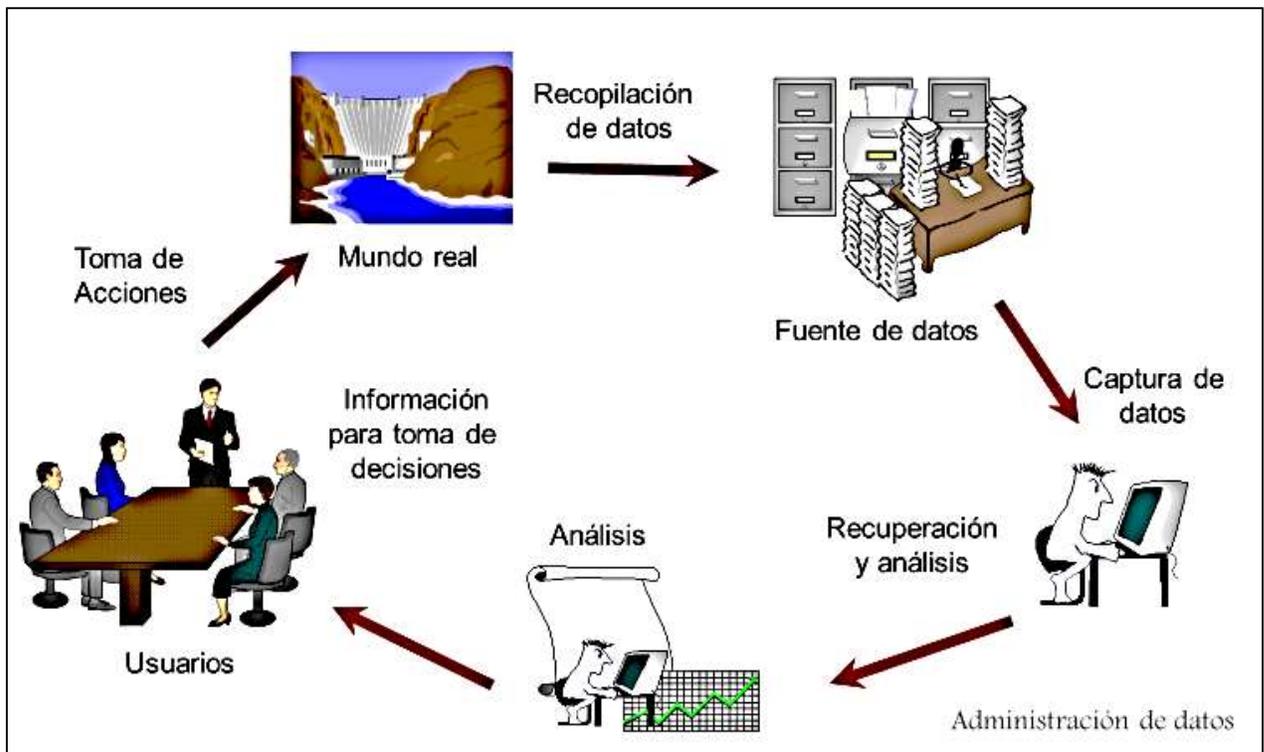


Figura 7: Ciclo de un SIG (INEGI, 2014).

1.6.3 Análisis espacial

El análisis espacial pone en evidencia estructuras y formas de organización espacial recurrentes, que resumen por ejemplo los modelos centro-periferia, los campos de interacción de tipo gravitatorio, las tramas urbanas jerarquizadas, los diversos tipos de redes o de territorios. Analiza los procesos que se encuentran en el origen de esas estructuras, a través de conceptos como los de distancia, de interacción espacial, de alcance espacial, de polarización, de centralidad, de estrategia o elección espacial de territorialidad (Pumain, 2004).

El análisis espacial, se vale de conceptos como la distancia, interacción espacial, alcance espacial, estrategia o elección espacial, territorialidad, leyes de la espacialidad vinculadas con esas formas y procesos y que están integradas con las teorías y modelos del funcionamiento y evolución de sistemas espaciales. (Moctezuma, 2009)

Según María R. Pulgarín (2007), el espacio como medio geográfico es entendido como el marco en el que se desarrolla la vida de los organismos vivos, en él se sustenta la existencia de combinaciones articuladas y dinámicas de medios de vida.

Por otra parte Javier Castañeda (1997), define el análisis espacial como el resultado de las relaciones entre la naturaleza y la sociedad, haciendo énfasis en la adaptación del hombre al medio natural. Según la distribución espacial, el medio geográfico puede ser urbano o rural, el urbano como expresión de una sociedad industrial y el rural como la manifestación de una sociedad agrícola

1.6.4. Aplicación en masas forestales

El estudio y actualización de datos las ciencias forestales ha sido posible, gracias al desarrollo de las técnicas e instrumentos de percepción remota por mencionar algunos; el manejo forestal, el manejo de áreas silvestres protegidas, la recreación, el manejo de cuencas, el manejo integrado de ecosistemas forestales, la evaluación

y monitoreo de la flora y vegetación son, entre otras, campos de amplia y continua aplicación de los SIG (Hernández, 2011).

Un estudio de SIG detallado se realiza a escala regional o local; la regional es aquella que tiene un ámbito nacional o abarca grandes regiones geográficas, en donde los estudios de tipo multitemporales donde se usan índices de vegetación en conjunto con indicadores de biomasa o área foliar. La de carácter local es aquella que se centra en un bosque específico o en algunos rodales, de manera de poder estimar los parámetros de interés (Hernández, 2011).



Figura 8: Selva baja caducifolia (Ancona, S/F)

Disponibile en: <http://www.lugares.inah.gob.mx>

Capítulo 2. Localización y descripción general del Estado de México

2.1. Localización del Estado de México

El estado de México se localiza en la altiplanicie mexicana, en la porción central de la República Mexicana, está comprendido entre los meridianos $98^{\circ} 36'$ y $100^{\circ} 37'$ de longitud oeste del meridiano de Greenwich y los paralelos $18^{\circ} 22'$ y $20^{\circ} 17'$ de latitud norte. La extensión territorial de la entidad es de 22, 499.95 km², lo que representa 1.1 % del territorio nacional, por lo cual ocupa el lugar 25 en cuanto a superficie, en comparación con las demás entidades federativas. El Estado de México colinda al norte con los estados de Querétaro e Hidalgo; al este con los estados de Puebla y Tlaxcala; al sur con los estados de Morelos y Guerrero; y al oeste con el estado de Michoacán de Ocampo y Guerrero (Figura9). Limita además con el Distrito Federal, rodeándolo en sus porciones norte, oriente y occidente (SMA Estado de México, 2008).



Figura 9: Ubicación del estado de México (INEGI, 2016).

2.2. Aspectos físicos del Estado de México

2.2.1. Clima

Debido a las variaciones del relieve se origina una gran diversidad de climas. Existe el templado subhúmedo C (w) que comprende 61.8 % del territorio; el cálido A (w) es característico del sur de la entidad y representa 20.8 %; el semiárido templado B(s) está presente en la parte norte y le corresponde 5.7 %; y el frío E (T) H y semifrío C (E) se localizan en zonas altas y montañosas, como el Nevado de Toluca, Popocatepetl e Iztaccíhuatl, comprendiendo 11.7 %. Según la clasificación de Köppen, modificada por E. García, en la figura 10 se muestran la distribución de climas que predominan en el Estado de México (SMA Estado de México, 2008).

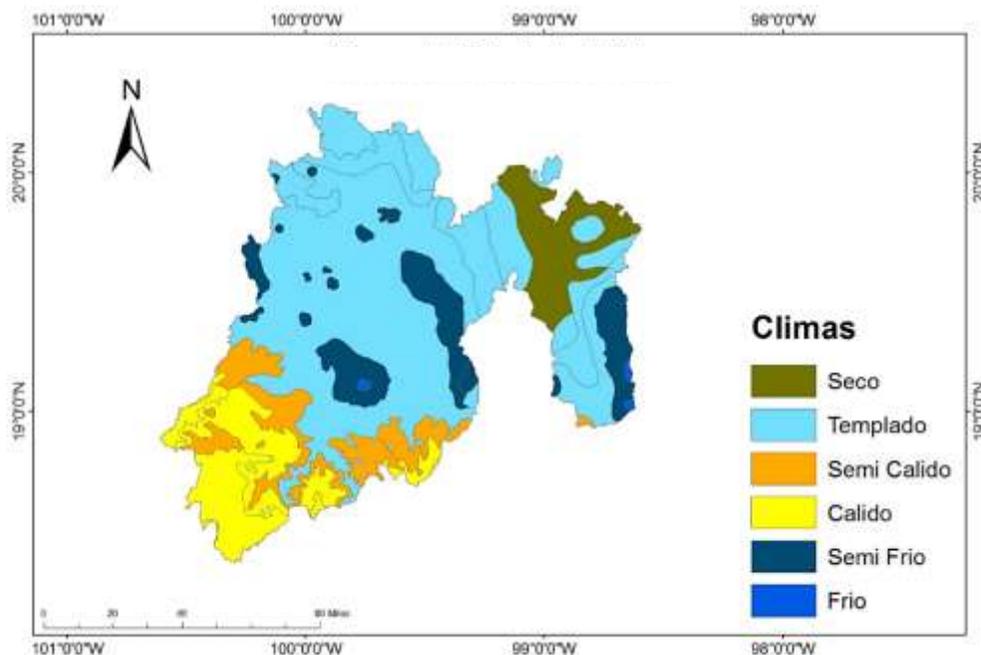


Figura 10: Clima del estado de México (Vidal-Zepeda, 1990).

Durante la primavera la temperatura aumenta considerablemente en casi todo el territorio de la entidad. Los valores más elevados se registran en mayo, principalmente en las regiones localizadas al suroeste, en donde se llegan a registrar de 36 a 40 °C. En montañas como la Sierra de las Cruces, la Sierra Nevada y el Nevado de Toluca, las temperaturas fluctúan entre 6 y 16 °C, mientras que en

los valles de México y Toluca oscilan entre 24 y 30 °C. El intenso calor en este período se debe a que el sol se halla en el cenit de estas latitudes y también a la escasa humedad atmosférica; circunstancia que facilita el paso de los rayos solares hasta la superficie del suelo. Las temperaturas medias anuales varían entre los 28 °C para las áreas bajas del suroeste y 8 °C en las principales montañas. Esta disposición térmica es ideal para el crecimiento y desarrollo de las plantas, razón por la cual la entidad dispone de buenas condiciones climáticas para la agricultura (SMA Estado de México, 2008).

Las lluvias en el verano se refuerzan por fenómenos convectivos, es decir, el calor que se concentra en los principales valles hace ascender la humedad, ésta se enfría y se origina la temporada de lluvias alrededor de la segunda quincena de mayo, finalizando en la primera quincena de octubre.

Después de las primeras lluvias, las temperaturas descienden, lo que genera abundancia de nubosidad y precipitación. Los tipos de nubes característicos en el verano son los cúmulos, estratos, estratocúmulos y cumulonimbos, estos últimos ocasionan fuertes tormentas eléctricas y granizadas, sobre todo en las sierras Nevada, de las Cruces, Nanchititla y el Nevado de Toluca. Durante el período de lluvia también caen granizadas frecuentes en las montañas más altas. Allí, la frecuencia del granizo es de 10 a 20 días al año. La menor incidencia corresponde a las áreas bajas del suroeste con menos de dos días al año. En estas estructuras orográficas y áreas adyacentes, es donde llueve más durante todo el año, mientras que los valles de México y Toluca, al localizarse entre grandes montañas que obstaculizan el libre paso de humedad, captan de 800 a 900 mm anualmente. La región más seca es el noreste, donde las lluvias son del orden de 600 a 700mm anuales (SMA Estado de México 2008). En la figura 11 se muestra la precipitación pluvial del Estado de México.

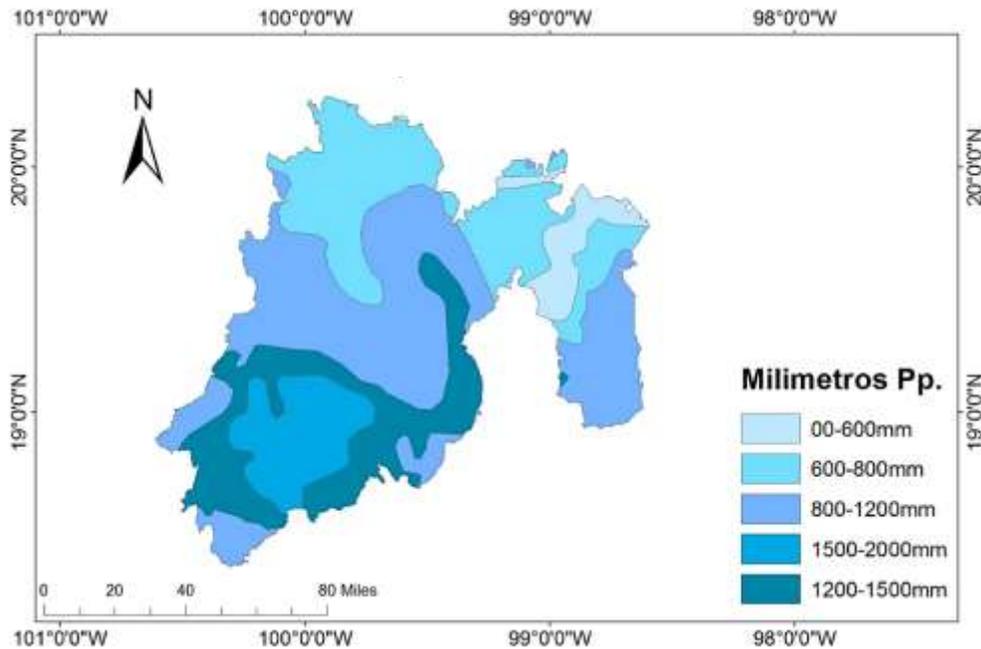


Figura 11: Precipitación pluvial en el Estado de México (Vidal-Zepeda, 1990).

2.2.2. Economía

El Estado de México tiene una economía altamente diversificada, razón por la cual es considerada como una entidad donde se desarrollan prácticamente todas las ramas de la actividad económica. Esta situación se explica por la gran dotación de recursos naturales que se han utilizado históricamente en la entidad, y conjuntamente con su capital humano, han permitido generar un cúmulo de riqueza productiva, por tanto resulta indispensable aprovechar de forma sustentable todos estos recursos.

La economía mexiquense ocupa el segundo lugar nacional, sólo por debajo del Distrito Federal, que genera poco más de 20 % del producto interno bruto (PIB) del país, en tanto el PIB estatal representa alrededor de 10 %.

En la entidad se encuentran establecidas 364 921 unidades económicas de diversas ramas de actividad, el 12.1 % del país, las cuales dan empleo a 1.5 millones de personas, esto es, 9.4 % del personal ocupado en México. En cuanto a la aportación de cada sector de actividad a la economía estatal, destaca la industria

manufacturera, particularmente la fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo.

En el sector primario es sobresaliente el primer lugar nacional en producción de clavel, crisantemo, rosa de invernadero, tuna y chícharo, así como en captura pesquera de carpa y de carne de ovino en canal.

Respecto a infraestructura, la entidad cuenta, además de la planta productiva propiamente, con más de 14,000 km de carreteras, 1,284 km de vías férreas, más de 1600 oficinas postales, 80 oficinas de telégrafos, 59 estaciones televisoras, 24 radiodifusoras y 3 aeropuertos, uno de ellos de carácter internacional. Para la atención a la salud, existen más de 2,000 unidades médicas públicas y privadas. En materia de educación se tienen 22,976 escuelas desde nivel básico hasta superior. En cuanto a vivienda, la población habita 3, 100,599 viviendas (SMA Estado de México 2008).

Concerniente a la participación del Estado de México en la producción nacional, según las grandes divisiones de actividad económica, destacan: industria manufactura, 16.0%; comercios, restaurantes y hoteles, 10.8%; servicios financieros y de alquiler, 9.4%; servicios personales, 8.5%; y transporte, almacenaje y comunicaciones, 10.2%. Por otra parte, se observa que el comercio, los servicios, así como la minería y la agricultura muestran mayor participación en relación con 1993. El aumento de la participación de los sectores comercio y servicio en el PIB y la disminución en la manufactura, ilustran la subcontratación de la economía (SMA Estado de México 2008).

2.2.3. Biodiversidad

La ubicación del Estado es determinante para su diversidad biológica. La historia geológica, relieve, topografía y régimen climático que son heterogéneos le confieren cualidades especiales para el desarrollo de una amplia biodiversidad en un territorio que apenas representa el 1 % de la superficie nacional.

Su integración dentro de la provincia de los Lagos y Volcanes del Anáhuac, le ha permitido contar con amplios contrastes en la elevación de su territorio, desde las zonas cercanas a los 300 msnm, donde se desarrolla la selva baja caducifolia, hasta más de 4,000 msnm en el Parque Nacional Ixta-Popo, pasando por un conjunto de grandes planicies ubicadas entre los 2,250 y 2,600 msnm, correspondientes a la Cuenca de México y Cuenca del Río Lerma, respectivamente, donde es predominante la vegetación de bosques templados, matorrales espinosos, humedales y pastizales de altura, entre otros (SMA Estado de México 2008).

El Eje Neo volcánico Transversal es el sistema montañoso que divide al país y al Estado de México, en dos grandes regiones biogeográficas: la Neártica y la Neotropical de manera general; la región Neártica comprende la porción centro y norte del territorio estatal, mientras que la región Neotropical abarca la parte suroeste, concretamente la zona cálida de la cuenca del Río Balsas.

En el Estado de México se tiene un registro de 3,896 especies silvestres, de las cuales 2,500 son de flora y 1,396 de fauna. Cabe recalcar que a la entidad llegan diferentes especies de aves migratorias, principalmente de patos, así como la mariposa monarca. Asimismo, cuenta con diferentes especies endémicas principalmente de plantas y mamíferos (SMA Estado de México 2008).

Capítulo 3. Estimación de Biomasa aérea en la selva baja caducifolia del Estado de México

3.1. Zona de base de datos

Para realizar el INFyS del Estado de México correspondientes a la Selva Baja Caducifolia, se seleccionaron los conglomerados siguiendo tres criterios principales:

- a) Que tuvieran definidas coordenadas geográficas para su ubicación.
- b) Que contaran con información de variables dasométricas.
- c) Que con ayuda de una exploración previa de las imágenes satelitales, se identificara que existía información espectral libre de nubosidad en las áreas de interés.

La información referente a los dos primeros criterios fue proporcionada en formato Excel por el personal de la “Protectora de Bosques del Estado de México” (PROBOSQUE) de la Secretaría del Medio Ambiente de dicho Estado, según su Inventario Forestal 2010¹.

El área de estudio comprendió de 17 conglomerados de selva baja caducifolia localizados en los siguientes municipios localizados en la Figura 12:

- Otzoloapan
- Amatepec
- Luvianos
- Sultepec
- Tejupilco
- Tlatlaya

¹ Para mayor información sobre el Inventario Forestal del Estado de México 2010 se puede consultar el sitio web http://portal2.edomex.gob.mx/probosque/publicaciones/inventario_forestal/index.htm

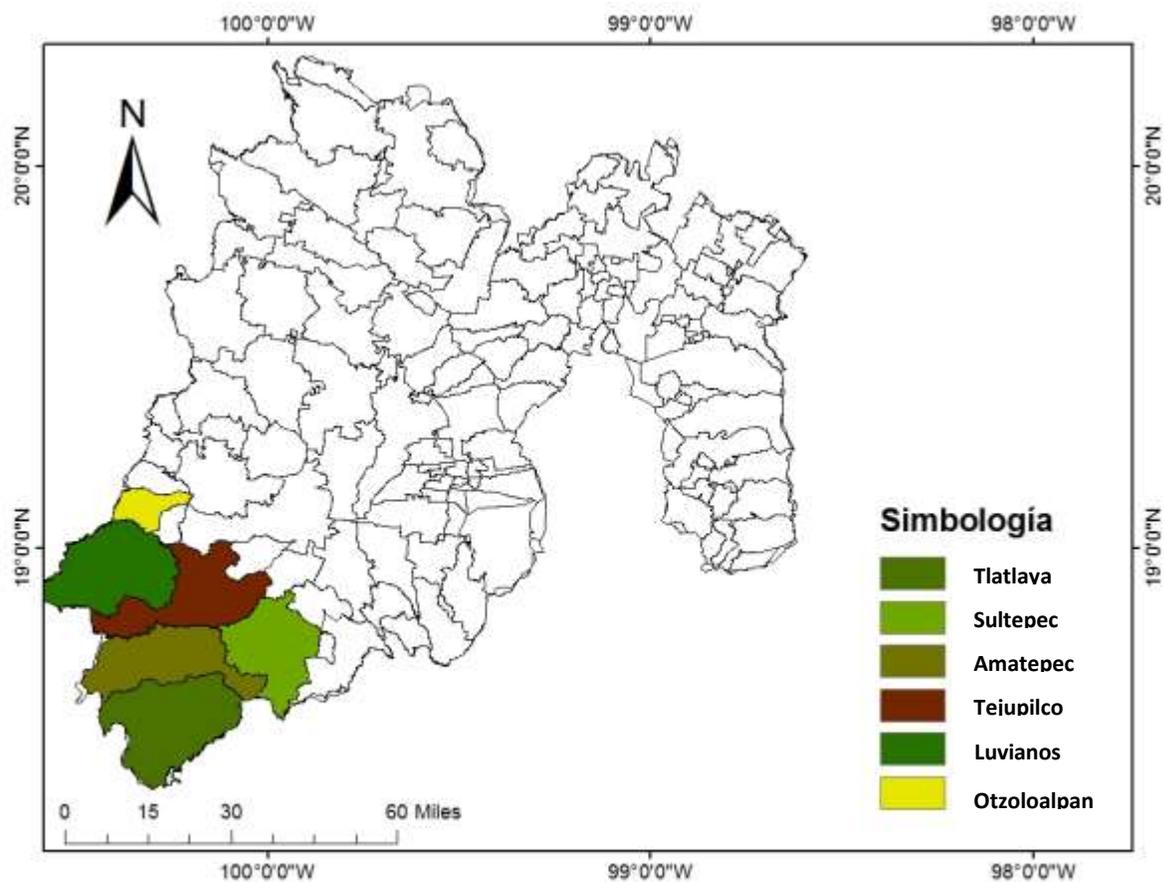


Figura 12: Municipios donde se ubica la base de datos (INEGI, 2006).

Tabla 4: Conglomerados de selva baja caducifolia.

No. de Conglomerado	Municipio	Latitud	Longitud
543	Otzoloapan	19° 07' 09.5551	100° 23' 10.7190
576	Otzoloapan	19° 05' 46.2118	100° 20' 20.2087
652	Otzoloapan	19° 03' 02.2203	100° 18' 56.4858
653	Otzoloapan	19° 03' 01.2643	100° 17' 30.7883
767	Luvianos	18° 57' 42.5870	100° 29' 00.0652
982	Amatepec	18° 46' 43.4112	100° 17' 43.0234
1080	Sultepec	18° 41' 00.3181	99° 54' 59.5100
1110	Amatepec	18° 38' 40.1449	100° 26' 21.7950
1112	Amatepec	18° 38' 38.3743	100° 23' 30.8869
1150	Tlatlaya	18° 35' 51.6797	100° 17' 51.1379
1153	Tlatlaya	18° 35' 47.7010	100° 12' 09.4661
1155	Tlatlaya	18° 35' 43.5174	100° 06' 27.7878
1157	Sultepec	18° 35' 39.1288	100° 00' 46.1042
1159	Sultepec	18° 35' 36.8372	99° 57' 55.2947
1186	Tlatlaya	18° 30' 25.8912	100° 17' 55.1896
1195	Tlatlaya	18° 29' 02.4864	100° 15' 05.5240
R053	Tejupilco	18° 49' 20.3013	100° 09' 07.6264

(Figura 13), Los puntos de color rojo indican la ubicación de cada uno de los conglomerados.

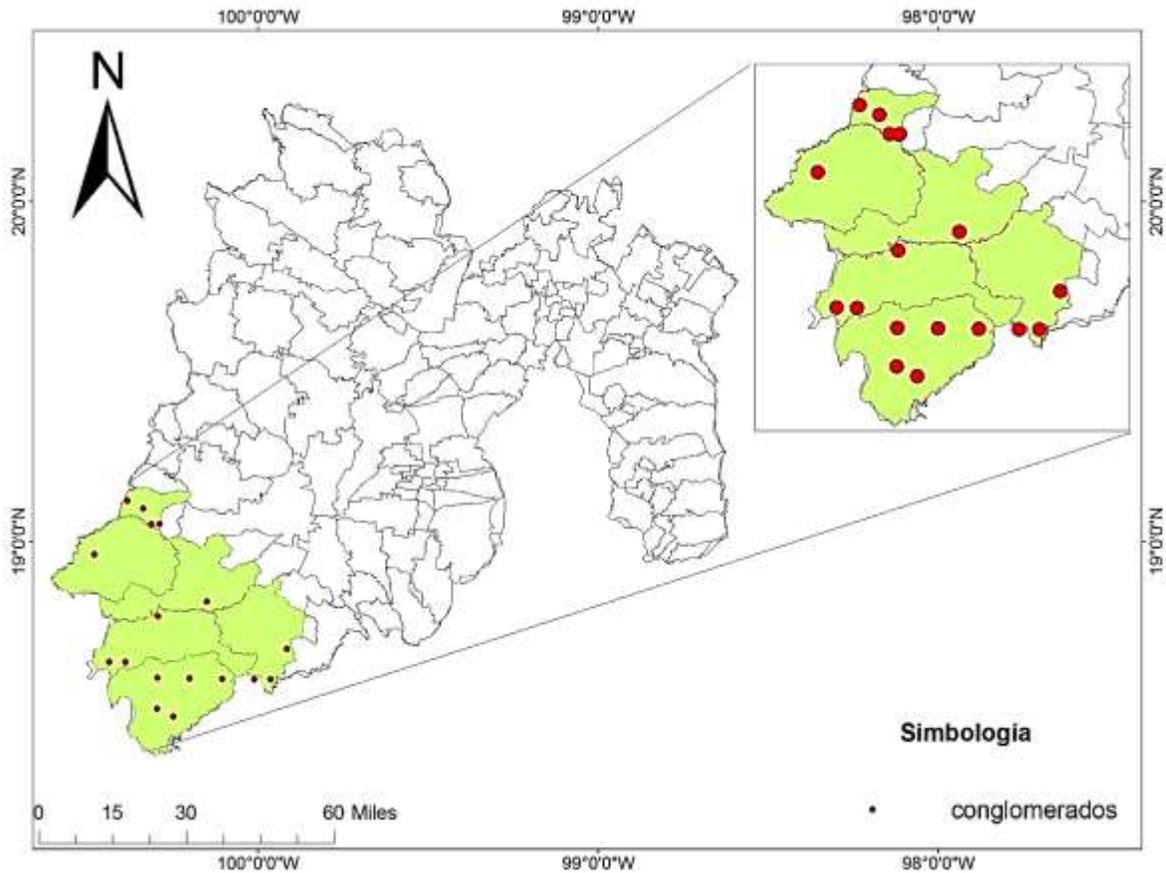


Figura 13: Ubicación física de los conglomerados (CONAFOR, 2012).

Los conglomerados seleccionados se ubicaron en el suroeste del estado, y colindan con los estados de Guerrero y Michoacán. El camino principal que está cercano a los sitios de estudio es la carretera federal número 134 Toluca - Ciudad Altamirano

Las coordenadas de los conglomerados (Tabla 4) sirvieron para definir un grupo de cuatro parcelas rectangulares ubicadas en forma de "y" invertida, en donde el centro de la parcela 1 corresponde a las coordenadas de cada conglomerado a partir del centro hasta el perímetro exterior de los tres sitios restantes hay con un radio de 56.42 metros (Figura 14), que corresponde a una parcela circular de una hectárea considerada como la (Unidad de Muestreo Primario (UMP)). Las cuatro Unidades de Muestreo Secundarias (UMS) o sitios de 40 por 10 m, se ubicaron el primero al

centro, el segundo al norte franco, el tercero a 120 grados al sureste y el cuarto a 240 grados o sea al suroeste. Es la metodología que empleó la CONAFOR en el INFyS a nivel nacional (CONAFOR, 2012).

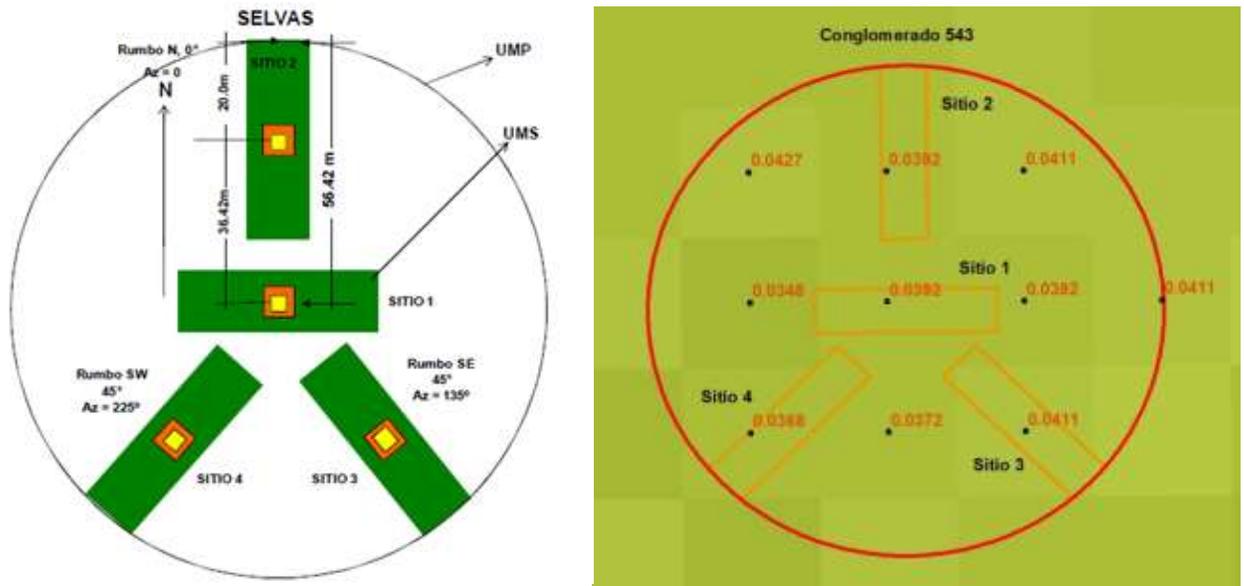


Figura 14: Delimitación de conglomerados y sus sitios de muestreo.

3.2. Descripción del método

3.2.1. Satélite Landsat 7

La teledetección y los sistemas de información geográfica han sido una herramienta muy útil en diversas aplicaciones ambientales al ser un medio rápido y efectivo para estudiar variables en grandes extensiones de terreno, entre ellas, la biomasa forestal (Soria y Granados, 2005; Méndez, *et.al.*, 2013).

El primer satélite para el estudio de los recursos naturales recibió el nombre de ERTS (Earth Resources Technological Satellite), que a partir del segundo lanzamiento se denominó programa Landsat (Land=Tierra y Sat=Satélite), el cual es gestionado de manera conjunta entre el Servicio Geológico de Estados Unidos

(USGS por sus siglas en inglés) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio estadounidense (NASA por sus siglas en inglés) (USGS, 2013).

Desde el año 1972, la serie de satélites Landsat 1 al 8 proporciona una de las mejores series históricas de visualización de la Tierra. Las imágenes que proporciona el satélite Landsat 7, lanzado en el año 1999, han sido de las más precisas geométrica y radiométricamente en lo que se refiere a satélites civiles en el mundo. El instrumento esencial a bordo es el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). El satélite sigue una órbita heliosincrónica (pasa siempre a la misma hora por un determinado lugar), tiene una resolución radiométrica de 8 bits y una temporal de 16 días (USGS, 2013).

Las imágenes Landsat 7 ETM+ tienen un nivel de procesamiento L1T, el cual indica que ya cuentan con georreferenciación; su sistema de referencia es el Worldwide Reference System-2. Otras características de las imágenes se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Algunas características del satélite Landsat 7 ETM+

Landsat 7			
Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)			
Banda	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)	Zona de espectro electromagnético
1	0.45-0.52	30	Visible azul
2	0.52-0.60	30	Visible verde
3	0.63-0.69	30	Visible rojo
4	0.77-0.90	30	Infrarrojo cercano 1
5	1.55-1.75	30	Infrarrojo cercano 2
6	10.40-12.50	30	Termal
7	2.09-2.35	30	Infrarrojo medio
8	0.52-.90	15	Pancromática

Todas las imágenes de este satélite adquiridas después del mes de mayo de 2003 presentan datos faltantes llamados comúnmente como “gaps”, esto fue ocasionado por una falla en su corrector de líneas de escaneo (SCL), para lo cual el USGS sugiere algunos métodos de corrección. La Figura 15 muestra un barrido con el SCL en buen funcionamiento (izquierda) y el mismo barrido con la distorsión ocasionada por la falla (derecha). En los visualizadores del USGS para descargar estas imágenes se advierte al usuario con la siguiente especificación: Landsat 7 ETM+ SCL-off.

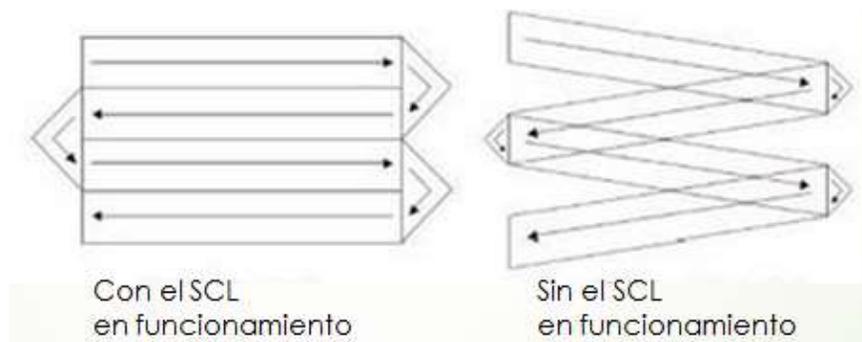


Figura 15: Escaneo según funcionamiento del SCL.

3.2.2. Teledetección e Índices de Vegetación

Existen diversos estudios que muestran la vinculación entre los datos de las imágenes de satélite, ya sea con las bandas originales y/o transformaciones de éstas, y la biomasa forestal (Cohen y Goward, 2004; García *et.al.*, 2005; Méndez *et.al.*, 2013). El cálculo de índices de vegetación a partir de imágenes satelitales implica la vinculación, a nivel de pixel, de determinadas bandas de la misma imagen; las bandas involucradas variarán de acuerdo al índice que se pretenda estudiar.

Los índices de vegetación se basan en el comportamiento radiométrico de la vegetación, bajo el supuesto de que cuando se encuentra en un estado saludable (mayor verdor), su respuesta espectral muestra un contraste alto entre las bandas visibles y la de infrarrojo cercano: los pigmentos de las hojas absorben la mayor cantidad de energía que reciben en la región visible del espectro electromagnético

y al contrario en la zona del infrarrojo cercano. Por lo general, dichos índices se calculan a partir de los valores de reflectancia de la imagen (Soria y Granados, 2005).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) ha sido por mucho tiempo el más empleado para estudios de seguimiento y evaluación de la dinámica vegetal, gracias a su facilidad de cálculo e interpretación (Chuvieco, 2002 citado por Carvacho, L. y Sánchez, M.; 2010).

El NDVI es un índice no dimensional, y por tanto sus valores oscilan entre -1 y +1. Los cuerpos de agua tienen valores negativos, las nubes valores cercanos a 0, el suelo descubierto o con vegetación rala presenta valores positivos aunque más cercanos al 0 que al 1, mientras que la vegetación densa, húmeda y bien desarrollada muestra los mayores valores de NDVI (Meneses, 2012). Su cálculo involucra las bandas del Infrarrojo cercano y del rojo de la siguiente manera:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Infrarrojo cercano} - \text{Rojo}}{\text{Infrarrojo cercano} + \text{Rojo}}$$

Se ha observado que los valores del NDVI son sensibles a los efectos de brillo de la atmósfera y el suelo, por lo que se han desarrollado otros índices que permiten minimizar este efecto, entre ellos se encuentra el Índice Verde de Vegetación de Diferencia Normalizada (GNDVI), que da cuenta del verdor de las plantas o de su actividad fotosintética. Generalmente se emplea para determinar el agua y la absorción de nitrógeno en el follaje del cultivo. Su fórmula es similar al del índice anterior, solo que ésta emplea la banda Verde de la imagen (Wang, *et.al.*, 2007; Poulain *et.al.*, 2010):

$$\text{GNDVI} = \frac{\text{Infrarrojo cercano} - \text{Verde}}{\text{Infrarrojo cercano} + \text{Verde}}$$

El Índice de Vegetación Diferenciado (DVI) distingue entre el suelo y la vegetación, sin embargo, no considera la reflectancia ni la radianza debido a los efectos atmosféricos o las sombras. Su fórmula es la siguiente (Turcker, 1979 citado en Exelis, 2015):

$$\text{DVI} = \text{Infrarrojo cercano} - \text{Rojo}$$

3.3. Adquisición de las imágenes Landsat 7 ETM+ SLC-off

Las áreas de estudio se cubrieron con el Path 27/Row 47 de la malla de escenas del satélite y se obtuvieron las imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ SLC-off disponibles para el 2010 en correspondencia con la información de variables dasométricas del Inventario Forestal del Estado de México del mismo año.

Se visualizaron todas las imágenes disponibles del año 2010 y se descargaron las que, en la medida de lo posible, tuvieran menos nubosidad sobre las áreas de interés, a través de uno de los servidores de imágenes satelitales del Servicio Geológico de Estados Unidos², el “Global Visualization Viewer (GloVis) del Earth Resources Observation and Science Center (EROS). Se obtuvieron un total de 16 imágenes.

Se creó una cuenta de registro para la descarga de las imágenes requeridas³ en el sitio <http://glovis.usgs.gov/> Se ingresó el Path 27/Row 47 en la sección delimitada para ello, así como el periodo del 1 de enero al 30 de abril y del 1 de octubre al 31 de diciembre del año 2010 para la colección de imágenes Landsat (Figura 16).

² El otro servidor es el “Earth Explorer” (EE), cuyo sitio web es <http://earthexplorer.usgs.gov/>

³ Este visualizador requiere que el programa JAVA esté actualizado y que el usuario tenga habilitados o permitidos los elementos emergentes de internet.

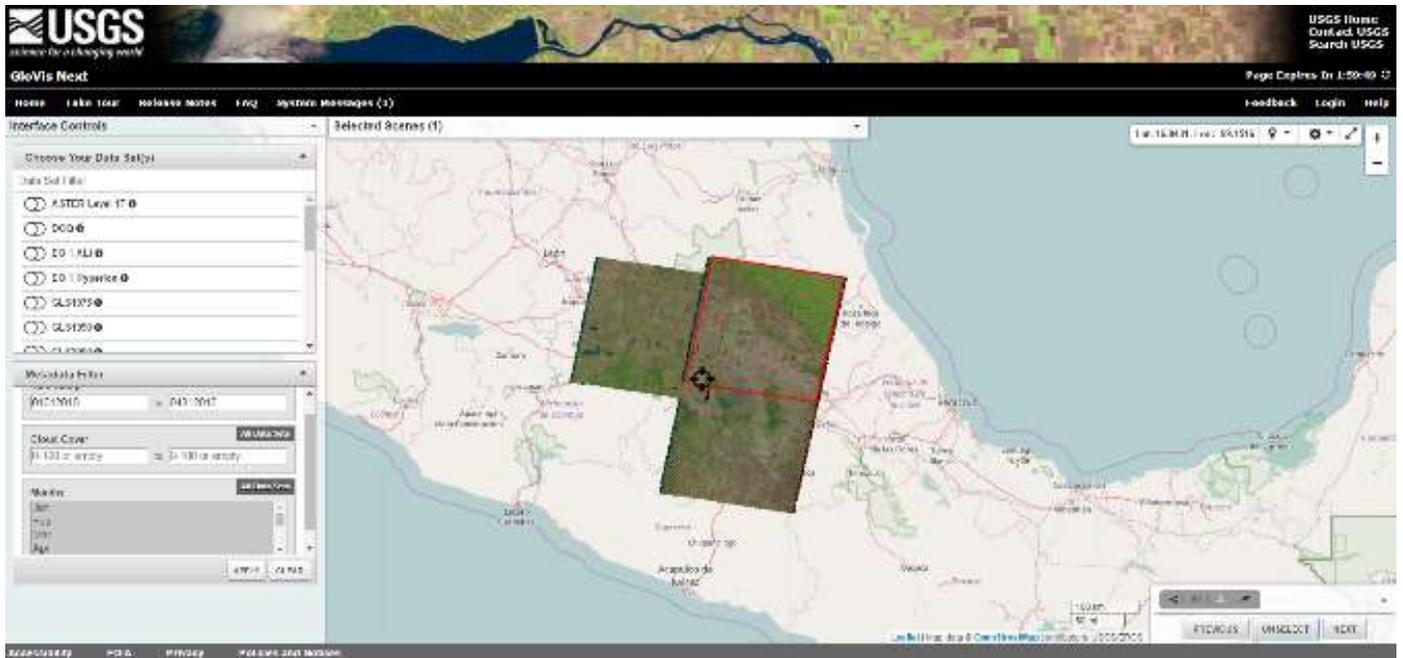


Figura 16: Visualizador GloVis para descarga de imágenes satelitales

En la Figura 17 se presentan las carpetas de las imágenes descargadas, de las cuales se seleccionó una imagen de la época seca del año, en la que los conglomerados seleccionados tuvieran información espectral óptima para su análisis.

- Path 27 Row 47**
- LE70270472010019EDC00.tar
 - LE70270472010051EDC00.tar
 - LE70270472010083EDC00.tar
 - LE70270472010099ASN00.tar
 - LE70270472010115EDC00.tar
 - LE70270472010147EDC00.tar
 - LE70270472010163EDC00.tar
 - LE70270472010179ASN00.tar
 - LE70270472010211ASN00.tar
 - LE70270472010227ASN00.tar
 - LE70270472010275EDC00.tar
 - LE70270472010291EDC00.tar
 - LE70270472010323EDC00.tar
 - LE70270472010339ASN00.tar
 - LE70270472010355ASN00.tar

Figura 17: Escenas Landsat descargadas para el Path 27/Row 47 del año 2010.

La escena que mejor se ajustó a los criterios mencionados fue, para la época seca del 21 de diciembre (Tabla 6, Figura 18).

Tabla 6: Escenas Landsat ETM+ SLC-off

Escena	Fecha de adquisición del satélite Año 2010
LE70270472010355ASN00	21 de diciembre

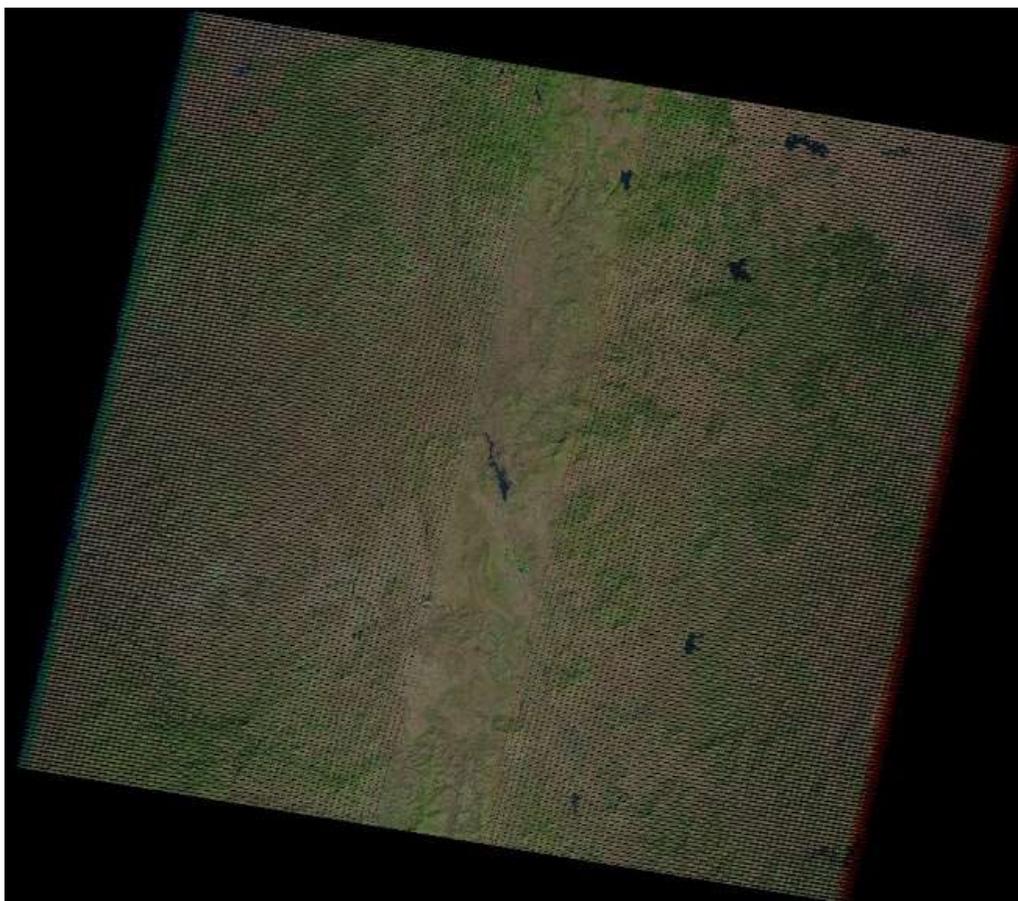


Figura 18: Imagen Landsat LE70270472010355ASN00

3.3.1. Preprocesamiento de las imágenes Landsat 7 ETM+ SLC-off

La imagen elegida cuenta con el nivel de procesamiento estándar L1T (Level 1T-precision and terrain correction), es decir provee una precisión sistemática radiométrica y geométrica al incorporar puntos de control y un Modelo Digital de Elevación para la precisión topográfica (USGS, 2013). Posteriormente, se realizaron otras calibraciones radiométricas a las imágenes seleccionadas en el programa ENVI 5.1. Sus datos se encontraron en Números Digitales (ND), por lo que fue necesario convertirlos a una escala espectral normalizada.

Edwards (2006), señala que no se pueden comparar en ND firmas espectrales de imágenes de sensores distintos o inclusive del mismo sensor si fueron capturadas en momentos diferentes, esto debido a que dicha escala depende completamente del sensor y que la radiancia percibida por éste depende, a su vez, de la luz solar al momento de la toma.

Con apoyo del módulo avanzado de corrección atmosférica FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), el cual está disponible en el programa ENVI (ENvironment for Visualizing Images) se realizó la corrección atmosférica para la imagen. Para ello fue necesario contar en todo momento con el archivo de los metadatos de las imágenes; de esta manera se convirtieron los ND a valores de radiancia en formato BIL, tipo de datos "Floating-point" y con un factor de 0.10 para escalar las unidades de salida a $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$; este formato fue requerido para ejecutar el módulo FLAASH. Las imágenes resultantes se dividieron entre el factor 10000 para obtener los valores de reflectancia para su posterior análisis (EXCELIS, 2014).

Como sugieren Miller *et al.*, (2011), el Centro de Observación de la Tierra (CEO, 2013) de la Universidad de Yale y el USGS (2013), la corrección del bandeo o “gaps” de las imágenes Landsat ETM+ SCL-off se realizó después de las correcciones mencionadas anteriormente. Esto se llevó a cabo con la herramienta Landsat Gapfill del mismo programa con el método “single file gap triangulation”. La Figura 19 muestra un ejemplo de corrección de bandeo de una sección de imagen.

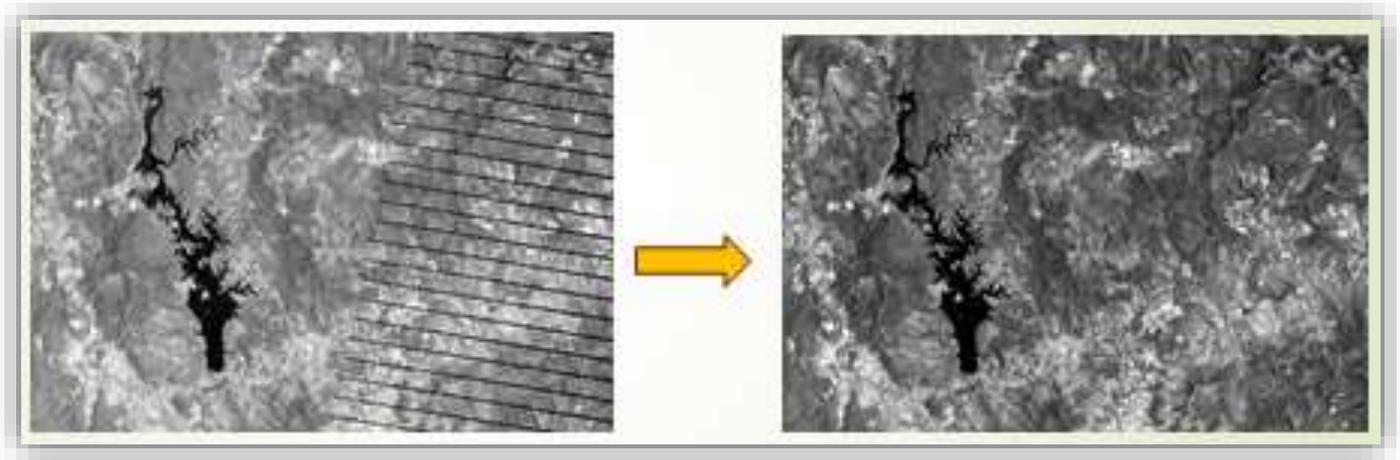


Figura 19: Ejemplo de una selección corregida por bandeo.

Si bien, el Geostatistical Neighborhood Similar Pixel Interpolator (GNSPI) ha sido calificado en diversos estudios como uno de los mejores métodos para resolver este inconveniente de las imágenes Landsat ETM+ SCL-off (Asmaa, *et.al.*, 2014; Zhu, *et.al.*, 2012; Romero, *et.al.*, 2015), éste no fue posible aplicarlo para las imágenes analizadas, ya que no estuvieron disponibles para las áreas de interés imágenes Landsat 5 del sensor “Thematic Mapper” (TM) y tampoco existieron imágenes óptimas de fechas cercanas a las seleccionadas; una u otra opción es necesaria para ejecutar dicho interpolador.

Para obtener la información espectral promedio de cada banda fue necesario extraer los datos de manera puntual para su posterior correlación con las variables dasométricas de la selva baja caducifolia del Inventario Forestal.

3.3.2. Cálculo de los índices de vegetación NDVI, DVI y GNDVI

El cálculo de los índices de vegetación de los sitio de estudio se realizó a partir de la información de reflectancia de las bandas correspondientes a cada índice. Esto se llevó a cabo en una hoja de cálculo de Excel.

En el NDVI se emplearon las bandas 3 (rojo) y 4 (Infrarrojo cercano) del sensor, según la relación descrita con anterioridad:

$$\text{NDVI Landsat 7 +ETM} = \frac{\text{Banda 4} - \text{Banda 3}}{\text{Banda 4} + \text{Banda 3}}$$

A su vez, el DVI se calculó bajo la siguiente función:

$$\text{DVI Landsat 7 +ETM} = \text{Banda 4} - \text{Banda 3}$$

En el cálculo del GNDVI se emplearon las bandas 2 (verde) y 4 (infrarrojo cercano) de la siguiente manera:

$$\text{GNDVI Landsat 7 +ETM} = \frac{\text{Banda 4} - \text{Banda 2}}{\text{Banda 4} + \text{Banda 2}}$$

Una vez obtenidos los índices de vegetación, se obtuvo la información promedio de cada conglomerado. La Figura 20 ejemplifica la forma en que se obtuvieron los resultados para un área determinada.

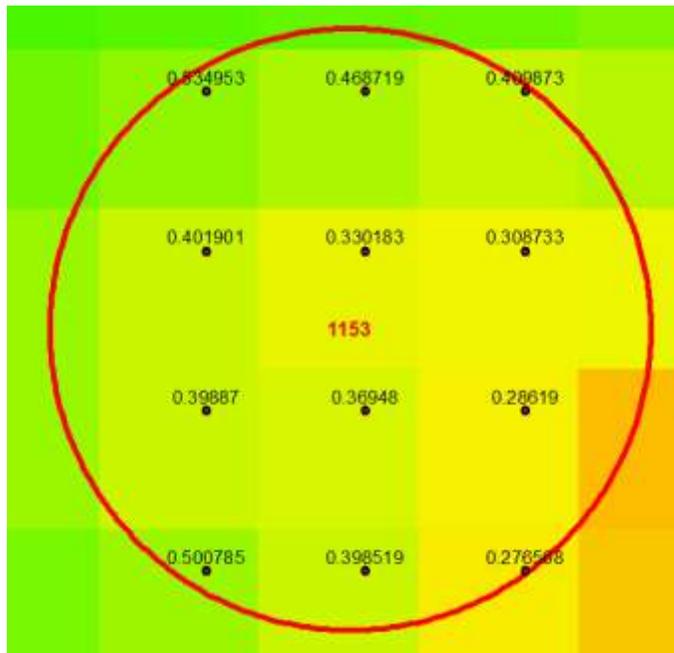


Figura 20: Ejemplo de resultado de índice de vegetación (NDVI) por conglomerado.

3.4. Obtención de datos del Inventario Forestal

Se obtuvieron las bases de datos del Inventario Forestal del Estado de México 2010, en Protectora de Bosques (PROBOSQUE) del Gobierno del Estado de México. Los datos de referencia bajo estudio fueron diámetro normal (D_n), altura de árboles (H) y cobertura arbórea (Coa). Se recopilaban ecuaciones de biomasa de las especies o grupos de especies correspondientes al ecosistema forestal objetivo.

Los datos dasométricos corresponden a 17 conglomerados medidos durante 2010. La base de datos fue depurada y se eliminaron valores atípicos (diámetros y alturas poco creíbles). Cada conglomerado se compone de cuatro sitios de muestreo de 400 m². Cada sitio de muestreo cuenta con información de variables de diámetro normal (D) en centímetros, altura total (H) en metros y diámetro de copa (DC) en metros (PROBOSQUE, 2015).

A partir de estas variables se obtuvieron cálculos a nivel árbol de las siguientes variables; área basal (Ab) en m², volumen total (V) en m³ y biomasa aérea (B) en Kg. El cálculo de área basal se estimó mediante la siguiente estructura:

$$Ab = \pi/40000 \times D^2, \text{ donde } \pi = 3.1416$$

El volumen total se consiguió empleando la ecuación general para todas las especies de selva baja caducifolia (Inventario Forestal del Estado de México, 1973) (Tabla 7).

Tabla 7: Ecuación de volumen total general para selva baja caducifolia.

Ecuación	Modelo	β_0	β_1	β_2	R_{adj}
2	$V = e^{\beta_0} D^{\beta_1} H^{\beta_2}$	-0.77785	1.872175	0.815238	0.9917
V = Volumen individual del árbol (m ³), D = Diámetro normal (m) y H = Altura total del árbol (m).					

Para el cálculo de la biomasa aérea se utilizó la ecuación general para selva baja caducifolia (Torres y Guevara, 2001) (Tabla 8).

Tabla 8: Ecuación de biomasa total para selva baja caducifolia.

Modelo	Parámetros	Ψ	ϵ^\dagger	R_{adj}
$B = \beta_0 + \beta_1 \times (V)$	β_0	12.225	2.01	0.971
	β_1	313.036	18.27	
B = Biomasa total, V = Volumen individual del árbol (m ³), Ψ = valor de los parámetros, ϵ^\dagger = error estándar de los parámetros.				

Para cada una de las variables: área basal, volumen, cobertura arbórea, biomasa y número de árboles se sumaron por cada unidad de muestreo (sitio de 400 m²).

Posteriormente, se obtuvo el promedio de los cuatros sitios por conglomerado y luego se extrapolaron a valores por hectárea.

3.4.1 Análisis estadísticos

Se usó regresión múltiple desde el punto de vista de asociación. Se empleó el modelo de la variable de interés y la auxiliar que a continuación se describe.

Procesamiento conjunto de los datos espectrales y los datos del inventario

Primero se hizo un análisis de correlación de Pearson entre los datos espectrales y los de campo (datos obtenidos por el inventario). Luego, en un primer enfoque se realizó un análisis de regresión múltiple por pasos (STEPWISE) para evaluar las relaciones entre las características de los bosques como variables dependientes (volumen y biomasa), y como variables independientes los valores promedios de las bandas espectrales y los índices de vegetación (Landsat 7 ETM+), con la finalidad de identificar modelos potenciales de regresión lineal múltiple adecuados para calcular área basal, volumen y biomasa en cada píxel de la imagen. Se pretendió que el mejor modelo permitiera estimar el inventario total de las variables en el área de estudio para mapear su distribución en ArcMap 10.2.1. El análisis de regresión por pasos (STEPWISE) selecciona un subconjunto de variables independientes que explica la mayor parte de la variabilidad en la variable dependiente, por lo tanto, estas variables fueron seleccionadas de acuerdo al resultado del modelo final, raíz del cuadrado medio de error (*RECM*), coeficiente de determinación ajustada (R_{Adj}^2), sesgo promedio absoluto (\bar{E}).

El segundo enfoque fue mediante la aplicación del **estimador de razón de media y regresión** que permite medir variables difíciles de medir a través de una función que depende de otra variable de fácil medición (variable auxiliar). Los estimadores de razón usan un valor calculado de la proporción entre la variable auxiliar (en este caso datos espectrales) y las variables dasométricas de interés (Valdez *et al.*, 2006).

Por último, se obtuvieron los **valores totales de las variables** (área basal, volumen y biomasa) de la selva baja caducifolia, considerando dos tipos de muestreo: simple al azar y estratificación.

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1. Variables auxiliares: NDVI, GNDVI y DVI

Los valores de los tres índices de vegetación calculados para cada conglomerado se muestran en la tabla 9, para la época seca con fecha del 21 de Diciembre.

Tabla 9: Índices de Vegetación por conglomerado en época seca del año con fecha del 21 de Diciembre.

Conglomerado	Sitio	NDVI Diciembre 21	GNDVI Diciembre 21	DVI Diciembre 21
543	1	0.502	0.531	0.103
	2	0.585	0.526	0.101
	3	0.491	0.535	0.133
	4	0.497	0.549	0.111
576	1	0.525	0.639	0.086
	2	0.508	0.614	0.079
	3	0.537	0.651	0.089
	4	0.527	0.650	0.089
652	1	0.293	0.450	0.104
	2	0.271	0.431	0.101
	3	0.354	0.499	0.089
	4	0.308	0.462	0.111
653	1	0.363	0.532	0.105
	2	0.436	0.525	0.105
	3	0.358	0.527	0.116
	4	0.352	0.550	0.110
767	1	0.429	0.542	0.132
	2	0.390	0.535	0.127
	3	0.387	0.532	0.114
	4	0.401	0.528	0.116
982	1	0.425	0.492	0.101
	2	0.416	0.480	0.097
	3	0.434	0.508	0.106
	4	0.465	0.510	0.104
1080	1	0.309	0.451	0.114
	2	0.331	0.477	0.122
	3	0.329	0.462	0.113
	4	0.305	0.457	0.117
1110	1	0.359	0.465	0.106
	2	0.423	0.503	0.120
	3	0.299	0.416	0.108
	4	0.312	0.498	0.115
1112	1	0.590	0.622	0.181
	2	0.656	0.655	0.185
	3	0.509	0.563	0.140
	4	0.436	0.548	0.179

1150	1	0.318	0.458	0.115
	2	0.354	0.510	0.125
	3	0.339	0.463	0.109
	4	0.330	0.462	0.115
1153	1	0.553	0.619	0.165
	2	0.526	0.589	0.162
	3	0.514	0.610	0.163
	4	0.579	0.607	0.162
1155	1	0.392	0.497	0.117
	2	0.329	0.444	0.118
	3	0.417	0.515	0.113
	4	0.391	0.472	0.088
1157	1	0.548	0.595	0.143
	2	0.571	0.605	0.147
	3	0.535	0.585	0.138
	4	0.537	0.591	0.141
1159	1	0.656	0.646	0.135
	2	0.626	0.630	0.127
	3	0.640	0.636	0.139
	4	0.618	0.584	0.135
1186	1	0.625	0.631	0.229
	2	0.586	0.605	0.207
	3	0.625	0.623	0.237
	4	0.587	0.626	0.224
1195	1	0.695	0.633	0.144
	2	0.708	0.660	0.160
	3	0.669	0.603	0.123
	4	0.638	0.611	0.148
R053	1	0.485	0.542	0.131
	2	0.436	0.527	0.129
	3	0.569	0.580	0.133
	4	0.437	0.528	0.126

Se observa, para el NDVI, un valor mínimo de 0.271 ubicado en el sitio 2 del conglomerado 652; mientras que el máximo de 0.708 se encuentra en el sitio 2 del conglomerado 1195 en el municipio de Tlatlaya.

El valor mínimo del GNDVI es de 0.416 en el sitio 3 del conglomerado 1110, ubicado en el municipio de Amatepec; el valor máximo de 0.660 se observa en sitio 2 del conglomerado 1195. Los valores promedio de los conglomerados oscilaron entre 0.461 y 0.639, situados en los conglomerados 576 del municipio de Otzoloapan y 652, respectivamente.

El DVI presenta sus valores extremos de 0.079 en el sitio 2 del conglomerado 576, en el municipio de Otzoloapan; y en el sitio 3 del conglomerado 1186 en el municipio de Tlatlaya.



Figura 21: LE70270472010355ASN00 Diciembre de 2010.

Los resultados arrojados por los índices de vegetación muestran valores menos elevados en la época seca del año. Al respecto, Tun-Dzul *et al.*, (2008), consideran que los índices pueden variar, entre otros factores, por la estación fenológica o por las condiciones hídricas del territorio. Diversas especies de la selva baja caducifolia presentes en la zona, entre ellas las del género *Bursera* (Burseraceae), son predominantemente arbustivas y arborescentes y pierden sus hojas en la época seca del año durante lapsos variables (6 a 8 meses) (Montaño & Espinosa, 2002).

Los valores de NDVI y GNDVI los valores inferiores de 0.5 significan que existe escasa vegetación y/o vegetación con poca actividad fotosintética, que se podría atribuir a la falta de humedad en la zona (Duque, 2008).

Los valores de la reflectancia de bandas espectrales, se observan en la tabla 10.

Tabla 10: Reflectancia de bandas espectrales.

Conglomerado	Sitio	B1	B2	B3	B4	B4	B7
543	1	0.033	0.047	0.051	0.154	0.147	0.079
	2	0.031	0.043	0.036	0.137	0.125	0.067
	3	0.044	0.061	0.069	0.202	0.199	0.140
	4	0.032	0.049	0.056	0.168	0.162	0.087
576	1	0.030	0.027	0.039	0.124	0.112	0.059
	2	0.030	0.028	0.038	0.117	0.111	0.057
	3	0.028	0.027	0.038	0.128	0.113	0.061
	4	0.032	0.027	0.040	0.130	0.112	0.059
652	1	0.058	0.087	0.126	0.230	0.290	0.175
	2	0.067	0.094	0.136	0.237	0.316	0.200
	3	0.044	0.057	0.081	0.170	0.213	0.128
	4	0.057	0.086	0.124	0.235	0.272	0.160
653	1	0.042	0.060	0.092	0.197	0.225	0.118
	2	0.036	0.054	0.068	0.173	0.180	0.092
	3	0.045	0.068	0.104	0.220	0.242	0.127
	4	0.041	0.061	0.101	0.211	0.231	0.116
767	1	0.047	0.065	0.088	0.220	0.237	0.124
	2	0.055	0.069	0.099	0.226	0.259	0.135
	3	0.053	0.062	0.090	0.204	0.238	0.126
	4	0.052	0.062	0.086	0.202	0.231	0.122
982	1	0.046	0.058	0.068	0.169	0.200	0.110
	2	0.042	0.058	0.068	0.165	0.197	0.109
	3	0.046	0.057	0.069	0.176	0.197	0.109
	4	0.043	0.053	0.060	0.163	0.185	0.099
1080	1	0.058	0.091	0.127	0.241	0.317	0.203
	2	0.060	0.086	0.123	0.244	0.319	0.201
	3	0.054	0.084	0.115	0.228	0.300	0.190
	4	0.059	0.093	0.133	0.250	0.328	0.210
1110	1	0.051	0.073	0.095	0.200	0.234	0.147
	2	0.048	0.067	0.082	0.202	0.210	0.133
	3	0.064	0.097	0.127	0.234	0.287	0.174
	4	0.052	0.081	0.127	0.241	0.283	0.167
1112	1	0.039	0.057	0.063	0.243	0.196	0.098
	2	0.038	0.049	0.049	0.234	0.182	0.091
	3	0.039	0.058	0.068	0.208	0.205	0.105
	4	0.058	0.086	0.116	0.296	0.278	0.150
1150	1	0.063	0.088	0.123	0.238	0.304	0.181
	2	0.058	0.078	0.114	0.240	0.272	0.152
	3	0.057	0.079	0.107	0.216	0.259	0.154
	4	0.061	0.085	0.117	0.232	0.283	0.166

1153	1	0.040	0.055	0.067	0.232	0.191	0.098
	2	0.041	0.061	0.073	0.236	0.192	0.097
	3	0.047	0.058	0.077	0.240	0.207	0.114
	4	0.035	0.054	0.059	0.220	0.181	0.090
1155	1	0.049	0.070	0.091	0.208	0.200	0.119
	2	0.064	0.092	0.121	0.239	0.258	0.161
	3	0.045	0.061	0.079	0.192	0.167	0.094
	4	0.042	0.056	0.069	0.157	0.160	0.095
1157	1	0.039	0.051	0.059	0.202	0.147	0.076
	2	0.036	0.050	0.055	0.202	0.148	0.076
	3	0.037	0.052	0.060	0.197	0.138	0.071
	4	0.040	0.052	0.061	0.202	0.147	0.077
1159	1	0.029	0.037	0.035	0.170	0.156	0.074
	2	0.031	0.037	0.038	0.165	0.142	0.066
	3	0.031	0.040	0.039	0.178	0.170	0.082
	4	0.028	0.046	0.042	0.177	0.170	0.089
1186	1	0.046	0.067	0.069	0.298	0.240	0.112
	2	0.046	0.069	0.073	0.280	0.241	0.117
	3	0.049	0.072	0.071	0.308	0.254	0.117
	4	0.049	0.069	0.079	0.302	0.259	0.126
1195	1	0.031	0.040	0.032	0.176	0.103	0.046
	2	0.034	0.040	0.033	0.193	0.140	0.054
	3	0.039	0.038	0.030	0.154	0.101	0.044
	4	0.037	0.046	0.042	0.190	0.119	0.051
R053	1	0.041	0.059	0.069	0.200	0.229	0.133
	2	0.043	0.066	0.083	0.212	0.259	0.153
	3	0.032	0.049	0.050	0.183	0.181	0.102
	4	0.045	0.064	0.081	0.207	0.248	0.149

4.2. Relación entre las variables forestales y los datos espectrales

En la tabla 11 se presentan los valores estadísticos de las variables empleadas en este estudio. El volumen promedio calculado para selva baja caducifolia fue de 30.26 ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), este resultado es similar al promedio nacional registrado (29.58 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) dato proporcionado por la CONAFOR (2012) para este tipo de vegetación, mientras tanto, el valor media nacional mencionado por INFyS (2012) en área basal fue de 4.74 ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$) y volumen de 23.72 ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), cifras similares a los obtenidos en este estudio. PROBOSQUE (2010) reporta un valor promedio estatal en volumen de 35.01 para selva baja caducifolia. Los valores medios observados en biomasa obtenidos mediante las Ecuación 1 y 2 son de 10.71 y 13.27 (Mg ha^{-1}).

Tabla 11: Estadísticas de las variables dasométricas utilizadas en el ajuste.

VARIABLES DASOMÉTRICAS	N	Media	D.E
Área basal (AB) en m ² ha ⁻¹	17	5.92	4.52
Volumen ¹ (V) en m ³ ha ⁻¹	17	30.26	23.35
Volumen ² (V) en m ³ ha ⁻¹	17	22.08	18.39
Biomasa ¹ (B) en Mg ha ⁻¹	17	13.27	10.27
Biomasa ² (B) en Mg ha ⁻¹	17	10.71	8.84

¹ Ecuación 2; ² Ecuación 1

Los resultados de correlacionar los datos del inventario: área basal, volumen y biomasa con las bandas 2 y 3 fueron los más altos; en cambio fueron menores con los NDVI y GNVI. En la Tabla 12 se observan los resultados.

Tabla 12: Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables espectrales y las variables forestales área basal (AB), volumen (VOL) y Biomasa (B).

	AB	V	V1	B	B1
Banda 1 (Azul)	-0.46627	-0.41713	-0.36961	-0.45731	-0.42741
Banda 2 (Verde)	-0.70396	-0.63883	-0.63590	-0.70319	-0.70353
Banda 3 (Rojo)	-0.64360	-0.62144	-0.62820	-0.64997	-0.65082
Banda 4 (Infra Rojo Cercano 1)	-0.08396	-0.06495	-0.05902	-0.08409	-0.08248
Banda 5 (Infra Rojo Cercano 2)	-0.38508	-0.34294	-0.38654	-0.39784	-0.43063
Banda 7 (Infra Rojo Medio)	-0.46726	-0.43706	-0.49661	-0.48973	-0.53131
NDI	0.43883	0.43242	0.43729	0.44315	0.44238
GNDVI	0.42145	0.39727	0.39797	0.42164	0.42082
DVI	0.14603	0.15373	0.16065	0.14802	0.14958

4.3. Modelos de regresión lineal

En la Tabla 13 se observan los calculos estadísticos de ajuste evaluado para la selección del modelo y estimador de los parámetros con sus respectivos errores estándar, de los modelos de regresión evaluados para estimar área basal (AB), Volumen (V) y biomasa (B).

Tabla 13: Modelos de regresión lineal múltiple.

	R_{adj}	RMSE	ρ	Ψ	$\epsilon \dagger$	∞
$AB = \beta_0 - (\beta_1 \times \text{Banda3}) - (\beta_2 \times \text{GNDVI})$	0.6762	2.75450	β_0	86.94929	20.40580	0.0008
			β_1	-763.71894	164.50388	0.0004
			β_2	-88.23554	26.22003	0.0046
$V1 = \beta_0 - (\beta_1 \times \text{Banda3}) - (\beta_2 \times \text{GNDVI})$	0.6582	14.59577	β_0	452.51281	108.12799	0.0009
			β_1	-3946.44801	871.68719	0.0005
			β_2	-463.78590	138.93691	0.0049
$V2 = \beta_0 - (\beta_1 \times \text{Banda3}) - (\beta_2 \times \text{GNDVI})$	0.6835	11.06244	β_0	363.78254	81.95242	0.0006
			β_1	-3184.22201	660.66957	0.0003
			β_2	-376.43314	105.30313	0.0030
$B1 = \beta_0 - (\beta_1 \times \text{Banda3}) - (\beta_2 \times \text{GNDVI})$	0.7014	6.00525	β_0	202.45616	44.48793	0.0005
			β_1	-1777.03462	358.64492	0.0002
			β_2	-206.72888	57.16387	0.0028
$B2 = \beta_0 - (\beta_1 \times \text{Banda3}) - (\beta_2 \times \text{GNDVI})$	0.7074	5.11456	β_0	174.68039	37.88955	0.0004
			β_1	-1538.43044	305.45128	0.0002
			β_2	-179.38432	48.68542	0.0025

Los cinco modelos presentaron buenas bases estadísticas para estimar con precisión las variables forestales (AB, V y B), las cuales están en función de la banda 3 (rojo) y GNDVI, variable auxiliar (variables independientes), además, son fáciles de obtener mediante imágenes satelitales y se pueden utilizar en grandes regiones similares al ecosistema en dónde se realizó el estudio, o sea, que el tipo de vegetación sea de selva baja caducifolia.

Los estimadores de los parámetros obtenidos en el ajuste, son significativamente diferentes al 95% ($p \leq 0.01$), con valores de errores estándar bajos. Se sugiere que las variables auxiliares de la banda 3 y el GNDVI, empleadas para predecir las variables forestales, son significativos; por tanto, contribuye a estimar con precisión la variable dependiente (AB, V y B).

El modelo de regresión lineal múltiple empleó como variables dependientes (AB, V y B) e independientes (banda 3 y GNDVI), estas variables explicaron la mayor variabilidad en el modelo, de acuerdo con el valor del coeficiente de determinación, además la raíz del cuadrado medio del error, que resultó más pequeño.

De acuerdo con los valores de la Tabla 13, las estimaciones de las variables forestales (AB, V y B) obtenidas con los modelos de regresión múltiple fueron los siguientes errores (RMSE) de 2.75450 (AB $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), 14.59577 (V1 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), 11.06244 (V2 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), 6.00525 (B1 Mg ha^{-1}) y 5.11456 (B2 Mg ha^{-1}).

Conclusiones

Los modelos de regresión lineal múltiple generados para estimar cada una de las variables forestales (AB, V y B) fueron estadísticamente significativos. Las bandas espectrales del rojo y GNDVI, resultaron ser las variables que ayudaron a explicar la mayor variabilidad.

Los datos espectrales e índices obtenidos con las imágenes Landsat 7 son de gran utilidad cuando se desea estimar el área basal, volumen y biomasa porque, son fáciles de aplicar para determinar las variables del ecosistema a evaluar.

Los sensores remotos permiten estimar de manera práctica y confiable las variables forestales, los cuales tienen la ventaja de reducir costos y tiempo, para cubrir grandes superficies.

Impactos de la metodología

El uso de esta herramienta tiene impactos económicos, sociales, científicos, Productivos y ambientales;

- Una de las propuestas de impacto económico es aquel que garantiza incrementos en productividad, ingresos y ahorros en costos de producción; ya que al usar los sensores remotos con apoyo de datos del inventario forestal de la selva baja caducifolia permitirá obtener datos de biomasa de manera rápida y económica.

- Los impactos del tipo social son los que repercuten directamente a grupos u organizaciones sociales; los poseedores de los bosques se verán beneficiados con la información de biomasa forestal mediante variables auxiliares (sensores remotos y datos de inventarios), la cual les permitirá tomar decisiones en el manejo sustentable de sus recursos forestales.

- El impacto científico la generación de un modelo de estimación de biomasa forestal por el método combinado (mediante el empleo de imágenes de satélite y datos de inventarios nacional forestal) para selva baja caducifolia.

- El impacto de uso tecnológico la generación de funciones de biomasa forestal para la selva baja caducifolia por medio del empleo de imágenes Landsat 7 y datos del inventario forestal en el estado de México.

- Los impactos ambientales esperados en recursos naturales principales como lo son agua, suelo, vegetación, biodiversidad y aire. Es que con la información biomasa de la selva baja caducifolia generada de forma oportuna, servirá como indicador de la calidad de los recursos naturales y permitirá generar propuestas de conservación de la biodiversidad en la región y de servicios ambientales de la selva baja caducifolia.

Bibliografía

ASMAA, A. (2014). SURVEY ON GAP FILLING ALGORITHMS IN LANDSAT 7 ETM+ IMAGES, Journal of Theoretical and Applied Information Technology.

AYLLIÓN, T. (2003). ELEMENTOS DE METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA. : Trillas, Ciudad de México, México.

BALVERA C. y COTLER H. (2009), ESTADO Y TENDENCIAS DE LOS SERVICIOS ECO SISTÉMICOS. EN CAPITAL NATURAL DE MÉXICO VOL.II: ESTADO DE CONSERVACIÓN Y TENDENCIAS DE CAMBIO, CONABIO, México.

BARROS, Vicente (2005), EL CAMBIO CLIMATICO GLOBAL, Libros del zorzal, Buenos Aires, Argentina.

BROWN, S; *et al.* (1996). MITIGATION OF CARBON EMISSION TO THE ATMOSPHERE BY FOREST MANAGEMENT, Commonwealth Forestry Review.

BUN-CA (2002), MANUALES SOBRE ENERGIA RENOVABLE: BIOMASA, San José, Costa Rica.

CASTAÑEDA, Javier (1997), LA NOCION DE ESPACIO EN LA GEOGRAFIA ESCOLAR, Universidad Autónoma Chapingo, México.

CHUVIECO, E. (1996), FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL, España.

CIESLA, William (1996), CAMBIO CLIMATICO, BOSQUES Y ORDENACIÓN FORESTAL. UNA VISIÓN DE CONJUNTO, FAO, Roma, Italia.

CIG (2002), PROGRAMA DE MODERNIZACION DE TIERRAS, Centro de Investigaciones Geoespaciales, Santo Domingo, República Dominicana.

CLARK, D.A. *et al.* (2001). MEASURING NET PRIMARY PRODUCTION IN FORESTS. CONCEPTS AND FIELD METHODS. ECOLOGICAL APPLICATIONS, ECOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, Estados Unidos.

COHEN, W., & GOWARD, S. (2004), LANDSAT'S ROLE IN ECOLOGICAL APPLICATIONS OF REMOTE SENSING, U. F. Agriculture, Ed.BioScience.

CONAFOR (2003), PROGRAMA NACIONAL FORESTAL, CONAFOR, México.

CONAFOR (2011), GUIA PRÁCTICA SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO Y BOSQUES, CONAFOR, México.

CONAFOR (2012), LA COMISIÓN NACIONAL FORESTAL EN LA HISTORIA Y EL FUTURO DE LA POLÍTICA FORESTAL DE MÉXICO, CONAFOR, México.

CONAFOR (2013), BOSQUES, CAMBIO CLIMÁTICO Y REDD+ EN MÉXICO, CONAFOR, México.

CONAFOR (2017), REPORTE SEMANAL DE RESULTADOS DE INCENDIOS FORESTALES, CONAFOR, México.

CONANP (2017), PROGRAMA DE PAGO DE SERVICIOS AMBIENTALES EN ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS, CONANP, México

CONDE, Cecilia (2007), MÉXICO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL, UNAM, México.

CORTÉS, Citali *et al.* (2014), GUIA PARA IDENTIFICAR ALTOS VALORES DE CONSERVACION EN ECOSISTEMAS FORESTALES DE MÉXICO, CONAFOR, México.

DURAN, R. y MÉNDEZ M. (Eds) (2010), BIODIVERSIDAD Y DESARROLLO HUMANO EN YUCATAN, CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, México.

EXELIS. (2015). EXELIS VISUAL INFORMATION SOLUTIONS, Broadband Greenness. <http://www.exelisvis.com/docs/BroadbandGreenness.html>

FAO (1990), EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA AGRICULTURA, LOS BOSQUES Y LA PESCA, FAO, Roma, Italia.

FAO (2006), LOS BOSQUES Y EL CAMBIO CLIMATICO, FAO, Roma, Italia.

FAO (2010), LA FAO, LOS BOSQUES Y EL CAMBIO CLIMATICO, FAO.

FAO (2010), LA GESTION DE LOS BOSQUES ANTE EL CAMBIO CLIMATICO, FAO.

FAO (2013), DIRECTRICES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LOS GESTORES FORESTALES, FAO.

FOLEY, J *et al.* (2007). AMAZONIA REVEALED: FOREST DEGRADATION AND LOSS OF ECOSYSTEM GOODS AND SERVICES IN THE AMAZON BASIN. FRONT. ECOL. ENVIRON.

FOLEY, J. *et al.* (2007). AMAZONIA REVEALED: FOREST DEGRADATION AND LOSS OF ECOSYSTEM GOODS AND SERVICES IN THE AMAZON BASIN, Front. Ecol. Environ.

GARCIA HUAMAN, Flor (2011), CICLOS BIOGEOQUIMICOS, UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS, Peru.

GARCÍA, A., *et al.* (2005), ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA RESIDUAL FORESTAL MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG EN MASAS PURAS DE PINUS HALEPENSIS Y P. SYLVESTRIS, IV Congreso Forestal Español de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, Palencia: Sociedad Española de Ciencias Forestales, España.

GARCIDUEÑAS, M. (1987), PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y ACUMULACIÓN DE NUTRIENTES EN UN RODAL DE PINUS MONTEZUMAE, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

GEREZ, Patricia y PURATA Silvia (2008), GUÍA PRÁCTICA FORESTAL DE SILVICULTURA COMUNITARIA, CONAFOR, México.

GFC (2009), LOS BOSQUES Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. MANUAL SOBRE EL PAPEL DE LOS BOSQUES EN LAS NEGOCIACIONES DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, Asunción, Paraguay.

GOMEZ, Tomas y VERGARA Miguel (2010), BIOMASA FORESTAL, UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA, Chile.

GRACE, J. (1991) VEGETATION AND CLIMATE: A TENUOUS LINK. EN MODERN ECOLOGY: BASIC APPLIED ASPECTS, Amsterdam, Países bajos.

GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO (2007), INFORME DE CONSENSO CIENTIFICO, IPCC.

GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO (2014), CAMBIO CLIMÁTICO 2014 IMPACTOS, ADAPTACIÓN Y VULNERABILIDAD, IPCC, Suiza.

HOPKIN, M. (2005), GREENHOUSE-GAS LEVELS HIGHEST FOR 650,000 YEARS, Nature.

HOUGHTON, R.A., HALL, F y GOETZ, S.J. (2009), IMPORTANCE OF BIOMASS IN THE GLOBAL CARBON CYCLE, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARC: Biogeosciences.

IICA (2012), POTENCIAL DE SERVICIOS AMBIENTALES EN LA PROPIEDAD SOCIAL EN MÉXICO, IICA, México.

ÍMAZ, Mireya *et al.* (2014), CAMBIO CLIMÁTICO, MÍRADAS DE GÉNERO, UNAM, México.

INECC (2006), EL CAMBIO CLIMATICO. EL DIA QUE ME CAMBIO EL CLIMA, SEMARNAT, México

INECC (2007), EL CARBONO, SEMARNAT, México

INECC (2012), ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO: VISIÓN, ELEMENTOS Y CRITERIOS PARA LA TOMA DE DECISIONES. SEMARNAT, México.

INEGI (2008), ANUARIO ESTADÍSTICO, INEGI, México.

INEGI (2014), SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.

INEGI (2015), ANUARIO ESTADÍSTICO Y GEOGRÁFICO DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, INEGI, México.

INE-SEMARNAP (1997), PRIMERA COMUNICACIÓN NACIONAL ANTE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, INE-SEMARNAP, México.

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGIA (2004), CAMBIO CLIMÁTICO UNA VISIÓN DESDE MÉXICO, SEMARNAT, México.

INVENTARIO NACIONAL FORESTAL Y DE SUELOS (2012). Informe 2004-2009.

MARTÍNEZ, J. (2005), PERCEPCIÓN REMOTA “FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL”, Comisión Nacional del Agua, México.

MAYRAND, Kareli y PAQUIN Marc (2004), PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES: ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE ESQUEMAS VIGENTES, Montreal, Canada.

MÉNDEZ, E. *et al.* (2013), DETERMINACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN CON IMÁGENES RADAR. ESTUDIO PILOTO EN ÁMBITO DE LA PROVINCIA DE HUELVA, XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección. 22 a 24 de Octubre de 2013, Madrid, España.

MENESES, C. (2012), EL ÍNDICE NORMALIZADO DIFERENCIAL DE LA VEGETACIÓN COMO INDICADOR DE LA DEGRADACIÓN DEL BOSQUE. *Unasylva: Revista internacional de silvicultura e industrias forestales.*

MERINO, Leticia (2004), CONSERVACIÓN O DETERIORO. EL IMPACTO DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS EN LAS INSTITUCIONES COMUNITARIAS Y EN LOS USOS DE LOS BOSQUES EN MÉXICO, INE, México.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005), ECOSYSTEMS AND HUMAN WELL-BEING: CURRENT STATE AND TRENDS, Washington, Estados Unidos.

MILLER, R. *et al.* (2011). A MULTI-SENSOR APPROACH TO EXAMINING THE DISTRIBUTION OF TOTAL SUSPENDED MATTER (TSM) IN THE ALBEMARLE-PAMLICO ESTUARINE SYSTEM, NC, USA.

MOCTEZUMA, Dayana (2009). EL ANÁLISIS ESPACIAL EN LA FORMULACIÓN Y EJECUCIÓN DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS EN VENEZUELA, Caracas, Venezuela.

MONTOYA, Guillermo *et al.* (1995). DESARROLLO FORESTAL SUSTENTABLE: CAPTURA DE CARBONO EN LAS ZONAS TZELTAL Y

TOJOLABAL DEL ESTADO DE CHIAPAS, UNIVERSIDAD DE EDIMBURGO, Reino Unido.

MORA, H. (2007), SENSORES REMOTOS. EN: MODULO GEOMÁTICA Y DEMOGRAFÍA, Manizales, Colombia.

ORDÓÑEZ DÍAZ, Benjamín (1999), CAPTURA DE CARBONO EN UN BOSQUE TEMPLADO: EL CASO DE SAN JUAN NUEVO, MICHOACAN, INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA, México.

OVALLES, P. (2011), IDENTIFICACION DE LAS CAUSAS DE LA DEFORESTACION Y LA DEGRADACION DE LOS BOSQUES EN LA REPUBLICA DOMINICANA, PROGRAMA REDDCCAD/GIZ EN CENTROAMÉRICA Y REPÚBLICA DOMINICANA, Republica Dominicana.

PARDÉ, J. (1980). FOREST BIOMASS. FORESTRY PRODUCTS ABSTRACT. REVIEW ARTICLE. COMMONWEALTH FORESTRY BUREAU, Francia.

PARDO, Mercedes (2007), EL IMPACTO SOCIAL DEL CAMBIO CLIMATICO, Universidad Carlos III de Madrid, España.

PÉREZ, M. *et al.* (2007), LOS SERVICIOS AMBIENTALES DE LOS BOSQUES, Asociación Española de Ecología Terrestre, España.

POULAIN, M. *et al.* (2010). RELATIONSHIPS BETWEEN FOREST VARIABLES AND REMOTE SENSING DATA IN A NOTHOFAGUS PUMILIO FOREST, Geocarto International.

PROBOSQUE (2015), INVETARIO FORESTAL 2010, Metepec, Estado de México: Secretaría del Medio Ambiente, México.

PULGARIN, Silvia (2007), EL ESPACIO GEOGRAFICO COMO OBJETO DE ENSEÑANZA EN EL ÁREA DE LAS CIENCIAS SOCIALES, Disponible en: <http://www.sogeocol.edu.co>

PUMAIN, Denise (2004), ANALISIS ESPACIAL “GENERALIDADES”. Disponible en: www.hypergeo.eu

REYES, J.A. *et al.* (2012), ATLAS DE SERVICIONS AMBIENTALES Y PROPIEDAD SOCIAL EN MÉXICO, IICA, México.

RODRÍGUEZ, Manuel y MANCE Henry (2009), CAMBIO CLIMATICO LO QUE ESTA EN JUEGO, Bogotá, Colombia.

ROMERO, M. (2015). COMPARISON OF DATA GAP-FILLING METHODS FOR LANDSAT ETM+ SLC-OFF IMAGERY FOR MONITORING FOREST DEGRADATION IN A SEMI-DECIDUOUS TROPICAL FOREST IN MEXICO, International Journal of Remote Sensing.

- RZEDOWSKI, Jerzy (2006), VEGETACIÓN DE MÉXICO, CONABIO, México.
- SANTIAGO, José Antonio *et al.* (2008), TENDENCIAS DEL CAMBIO CLIMATICO GLOBAL Y LOS EVENTOS EXTREMOS ASOCIADOS, Universidad Autónoma Indígena de México, México.
- SCHIMEL, David *et al.* (1995), CO2 AND THE CARBON CYCLE, UNIVERSIDAD DE CAMBRIDGE, Inglaterra.
- SCHLEGEL, B. GAYOSO, J. Y GUERRA, J. (2000), MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO DE BIOMASA FORESTAL. MEDICIÓN DE CAPACIDAD DE CAPTURA DE CARBONO EN BOSQUES DE CHILE Y PROMOCIÓN EN EL MERCADO MUNDIAL, Universidad Austral de Chile, Chile.
- SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE (2008), INVENTARIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y VULNERABILIDAD DEL ESTADO DE MÉXICO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL, SMA, Estado de México, México.
- SEMAR (2009), PERCEPCION REMOTA, Secretaria de Marina, México.
- SEMARNAT (2007), PROGRAMA DE PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES, SEMARNAT, México.
- SEMARNAT (2009), CAMBIO CLIMATICO. CIENCIA, EVIDENCIA Y ACCIONES, SEMARNAT, México.
- SMITH, T.M. *et al.* (1993), THE GLOBAL TERRESTRIAL CARBON CYCLE.WATER, AIR AND SOIL POLLUTION, Países Bajos.
- SORIA, J. y GRANADOS, R. (2005), RELACIÓN ENTRE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN OBTENIDOS DE LOS SENSORES AVHRR DEL SATÉLITE NOAA Y TM DEL LANDSAT, U.A., México.
- TORRES R. y GUEVARA, S. (2002), EL POTENCIAL DE MÉXICO PARA LA PRODUCCIÓN DE SERVICIOS AMBIENTALES: CAPTURA DE CARBONO Y DESEMPEÑO HIDRÁULICA, Gaceta ecológica, INE-SEMARNAT. NUM. 63. México: Nueva época.
- USEROS, José Luis (2012), EL CAMBIO CLIMATICO SUS CAUSAS Y EFECTOS MEDIOAMBIENTALES, Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid, España.
- USGS (2013). U.S. Geological Survey. Recuperado en Septiembre de 2015, de <http://landsat.usgs.gov>
- VALDÉS, Ofelia y NEGREROS Patricia (2010), EL MANEJO FORESTAL COMUNITARIO EN MÉXICO, Universidad Veracruzana, México.

VALDEZ, J. *et al.* (2006). ESTIMACIÓN DE COBERTURA ARBÓREA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES MULTIESPECTRALES DE ALTA RESOLUCIÓN. Agrociencia.

WANG, F.*et al.* (2007), NEW VEGETATION INDEX AND ITS APPLICATION IN ESTIMATING LEAF AREA INDEX, Rice science.

WATSON, Robert *et al.* (1996), TECNOLOGÍAS, POLÍTICAS Y MEDIDAS PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO, IPCC.

ZHU, X. *et al.* (2012), A NEW GEOSTATISTICAL APPROACH FOR FILLING GAPS IN LANDSAT ETM+ SLC-OFF IMAGES, (Elsevier, Ed.) Remote Sensing of Environment.