

**ESTIMACIÓN Y VALORACIÓN ECONÓMICA DEL CARBONO ALMACENADO  
EN LA BIOMASA AÉREA DEL CORREDOR BIOLÓGICO  
DE LA SELVA EL OCOTE – CAÑÓN DEL SUMIDERO**

**PROYECTO FINAL DE GEOMÁTICA APLICADA**

**TUTOR:**

**JOSÉ MAURICIO GALEANA PIZAÑA**

**ELABORADO POR:**

**GUILLERMO FERNANDO ESQUIVEL TABARES**

**MARIO CELESTINO GONZÁLEZ STEFANONI**

**GABRIEL ALEJANDRO MORALES MARTÍNEZ**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y GEOMÁTICA**

**INGENIERO JORGE L. TAMAYO**

**CIUDAD DE MÉXICO**

**DICIEMBRE 2017**

## TABLA DE CONTENIDO

Y

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	PROBLEMÁTICA.....	4
3.	JUSTIFICACIÓN.....	5
4.	OBJETIVOS.....	6
4.1	General.....	6
4.2	Específicos.....	6
5.	HIPÓTESIS.....	6
6.	MARCO TEORICO.....	7
6.1	Ciclo del carbono.....	7
6.2	Servicios ecosistémicos.....	8
6.3	Valoración de los servicios ecosistémicos.....	8
6.4	Biomasa aérea y métodos para estimarla.....	10
6.5	Estimación del carbono.....	11
7.	NORMATIVIDAD.....	12
8.	METODOLOGÍA.....	13
8.1	Área de Estudio.....	13
8.2	Materiales.....	17
8.3	Metodología.....	18
8.3.1	Cambio de uso de suelo.....	18
8.3.2	Estimación del carbono.....	20
8.3.3	Estimación económica del carbono almacenado.....	23
9.	RESULTADOS.....	24
9.1	Cambio de uso de suelo.....	24
9.2	Modelación prospectiva.....	24
9.3	Estimación del carbono.....	29
9.4	Estimación económica.....	33
10.	CONCLUSIÓN.....	34
10.2	RECOMENDACIONES.....	35
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
11.2	Recursos electrónicos.....	39

## 1. INTRODUCCIÓN

~~En su propuesta~~ La iniciativa REDD+, busca una concienciación del impacto que tienen los cambios de uso del suelo sobre el fenómeno del cambio climático. Para ello, este programa implementa e incentiva a países en vías de desarrollo a que promuevan la conservación, la gestión sostenible y el aumento de los bosques, con el fin de crear reservas de carbono que permita el secuestro de CO<sub>2</sub> en la reducción de este tipo de emisiones sobre la atmósfera (ProForest, 2011).

El documento que aquí se presenta tiene por objeto aportar información relacionada a la estimación del volumen de carbono que almacena el área de estudio, conformada por las áreas naturales protegidas de la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote, Parque Nacional Cañón del Sumidero, Zona Sujeta a Conservación Ecológica La Pera y Área de Protección de Recursos Naturales Villa Allende, de manera tal que, para cuestiones institucionales, sea posible realizar una estimación técnica del valor económico del volumen almacenado de carbono, brindando una herramienta que permita complementar el proceso de toma de decisiones. Para ello se contempla un análisis de cambio de uso de suelo multitemporal que relaciona las modificaciones de la cobertura vegetal, con la cantidad de carbono almacenado en cada periodo.

Por otro lado, se tiene que uno de los principales factores que amenazan las áreas naturales protegidas en este caso, se refiere a la expansión de la frontera agrícola, la cual es definida por la Secretaría de Programación y Presupuesto -SPP- (1980), como aquellas áreas propensas a ser incorporadas a actividades agrícolas bajo diversos métodos, que bien pueden estar relacionados a la demanda de suelo para la gestación de actividades económicas, como también lo es convertirse en recurso para la apropiación de tierras o el establecimiento de asentamientos. En este sentido, se pretende evaluar igualmente, la incidencia que tiene sobre las áreas naturales su declaratoria como Áreas Naturales Protegidas, evaluando para ello modelos con restricción y sin restricción de invasión para la estimación de cambios.

De este modo, el producto final derivado del presente documento, brindará una herramienta visual interactiva disponible para la Asociación Civil Medio Ambiente y Gestión de Riesgos JOPEGG, quienes a su vez, tendrán un papel difusor de la información obtenida de aquí, el cual podrá resultar de interés tanto para instituciones oficiales tomadoras de decisiones (CONANP, SEMARNAT, CONAFOR, entre otras), como para organizaciones civiles que igualmente se encuentren involucradas en temas de conservación de recursos naturales y sociedad. Finalmente, de manera indirecta se busca lograr una concientización a partir de la presentación de datos técnicamente soportados que brindan una aproximación económica del costo-beneficio del almacenamiento de carbono en áreas naturales, pretendiendo así lograr una mayor difusión por parte de las instituciones antes mencionadas.

## 2. PROBLEMÁTICA

Los bosques y selvas juegan un papel importante en el almacenamiento de carbono y captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como resultado de los procesos fotosintéticos, de respiración y de degradación de materia seca; son considerados como los ecosistemas terrestres responsables de la mayor parte de los flujos de carbono entre la tierra y la atmósfera (Tipper, 1998).

El almacenamiento neto de carbono orgánico en los bosques depende del manejo dado a la cobertura vegetal, edad, distribución de tamaños, estructura y composición de ésta. La estimación adecuada de la biomasa de un bosque es un elemento de mucha importancia, ya que permite determinar el potencial de carbono que se puede almacenar en una superficie de vegetación natural (bosques y selvas) y de manera institucional cumplir con estrategias o compromisos de mitigación de gases de efecto invernadero (Rincón-Ruiz et al., 2014).

De acuerdo con el quinto informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2015), en su informe del grupo I: las bases físicas del cambio, afirman que las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera han tenido considerables aumentos por las diferentes actividades humanas, de manera muy particular por el uso de combustibles fósiles y la deforestación o cambio de uso de suelo.

Las afectaciones por pérdida de bosques se ven reflejadas, en primer lugar, en mayores emisiones de carbono a la atmósfera, lo que tendría mayor impacto en los procesos que contribuyen al cambio climático. También habría un impacto negativo a la biodiversidad que habita este espacio, e incluso afectaciones de los regímenes hidrológicos de la cuenca.

Aquí es importante mencionar que existe el costo de oportunidad, que trata del costo asociado de dejar de percibir beneficios (Pagiola y Bosquet, 2010). En este sentido, se piensa que los agentes económicos no destruyen los bosques por gusto o el placer mismo de acabar con ellos, sino que existen beneficios económicos, como la obtención de maderas para la industria de la construcción o maderera, o la ampliación de la frontera agrícola (Rincón-Ruiz et al., 2014). De esta manera, al contemplar estos costos, se puede determinar si la afectación es directamente a grupos vulnerables o a los grupos con poder económico.

De acuerdo a Greenpeace (2017), México posee una de las tasas de deforestación más altas del planeta, contabilizadas en la pérdida de al menos 500,000 hectáreas de bosque y selva por año. La biodiversidad es uno de los principales elementos que se pone en riesgo, al igual que la dependencia de las comunidades próximas y los nacimientos de agua. Entre los factores que contribuyen a la deforestación se encuentra como primera instancia el cambio de uso del suelo para convertir bosques en potreros, y también la tala ilegal, que para México se estima en un 70% del total de la madera explotada.

Es a partir de lo anterior que existe una preocupación por la pérdida de vegetación natural en las áreas naturales protegidas como las de la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote (REBISO), Parque Nacional Cañón del Sumidero (PNCS), Zona Sujeta a Conservación Ecológica La Pera y Área de Protección de Recursos Naturales Villa Allende (APRNVA),

reglamentadas cada una respectivamente en los años 2000 (DOF, 2000), 1980 (DOF, 1980), 2006 y 1939 (SEMARNAT, 2000), las cuales tienen una importancia dada los servicios ecosistémicos que ofrecen, que de acuerdo a la estrategia EcoValor Mx (CONANP-GIZ, 2017) van del orden de regulación (climática, inundaciones, plagas, purificación del agua), culturales (espirituales, recreativos y educativos) y de provisión (alimentos, madera y fibra).

### **3. JUSTIFICACIÓN**

Diversos estudios en la actualidad han demostrado que los sistemas sociales y económicos no están desvinculados de los ecológicos, presentando una interdependencia significativa entre todos los agentes que se desarrollan en las distintas regiones del planeta. El ser humano depende de los servicios que le proporciona la biodiversidad que lo rodea. Así, han surgido iniciativas a nivel mundial que procuran contribuir con trabajos que sirvan de herramientas para los tomadores de decisiones en la incorporación de los servicios ecosistémicos en el quehacer cotidiano. Dentro de estas iniciativas se encuentran el Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020 y las Metas de Aichi, la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (EEM) y la iniciativa “La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad” (TEEB por sus siglas en inglés; Rincón-Ruiz et al., 2014).

La importancia de la biodiversidad radica en que esta nos proporciona los recursos que el ser humano necesita para su subsistencia y desarrollo, los llamados servicios ecosistémicos. En la EEM, diversos científicos de distintas disciplinas y países, con la tutela de las Naciones Unidas, realizaron un trabajo en el que evidencian las afectaciones para los seres humanos por la pérdida y degradación de ecosistemas. Clasifican los servicios ecosistémicos de acuerdo a los siguientes grupos (ibid):

- Servicios de provisión – bienes que se obtienen directamente de los ecosistemas (alimentos, agua, madera).
- Servicios de regulación – beneficios que se obtienen por la regulación de procesos ecosistémicos (purificación del agua, calidad del aire).
- Servicios culturales – beneficios no materiales (belleza escénica, recreación).
- Servicios de soporte – procesos ecológicos necesarios para soportar y proveer a los demás servicios ecosistémicos (fotosíntesis, ciclo del agua).

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 General

Estimar la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea del corredor biológico de El Ocote y el Cañón del Sumidero.

### 4.2 Específicos

Analizar el cambio de uso de suelo del área de estudio

Modelar la distribución espacial del carbono almacenado en la biomasa aérea

Estimar el valor económico del carbono almacenado.

Realizar un modelo prospectivo de cambio de uso de suelo, carbono almacenado en la biomasa aérea y valoración económica para el año 2021.

## 5. HIPÓTESIS

La declaratoria como reservas de área natural protegidas de las cuatro entidades que conforman el Corredor Ecológico de la Selva El Ocote – Cañón del Sumidero, contribuye a una mayor conservación de la vegetación allí presente, y a una menor alteración en el cambio de uso del suelo.

Del mismo modo, la pérdida de vegetación natural está asociada a una transición del área natural a usos de tipo agrícola-agropecuaria, y este cambio supera el 10% del área total del corredor biológico.

## 6. MARCO TEORICO

### 6.1 Ciclo del carbono

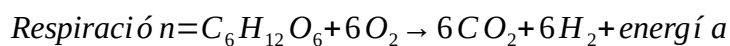
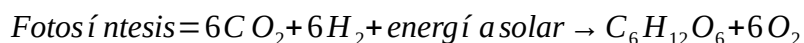
El carbono es un elemento químico que se encuentra en todas las moléculas de los organismos vivos, por lo que es la base de la materia orgánica. Se localiza en la atmósfera como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El ciclo del carbono se puede definir como un proceso biogeoquímico, debido a que intervienen distintas capas de la Tierra (la biósfera, litósfera, hidrósfera y atmósfera), se da entre distintos organismos vivientes y con las reacciones químicas permite que se obtenga carbono a partir del  $\text{CO}_2$  y viceversa, generar  $\text{CO}_2$  a partir del carbono presente en los organismos (BioEnciclopedia, 2016).

Conocer y entender este ciclo permite estudiar los efectos de la intervención del hombre sobre el medio ambiente y los efectos de esto sobre el cambio climático (Pérez, 2017). La importancia del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera es que a niveles equilibrados, por el tamaño de las partículas, es capaz de atrapar parte de la radiación solar, por lo que ayuda a mantener una temperatura idónea para el desarrollo de la vida (BioEnciclopedia, 2016).

El ciclo del carbono es un proceso no lineal, ya que las reacciones químicas en las que el carbono se intercambia suceden simultáneamente. Dentro de estas reacciones e intercambios, se pueden citar las siguientes (Ibid.):

- Procesos geológicos, como erupciones volcánicas, que liberan grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. También los incendios naturales.
- Las plantas capturan el  $\text{CO}_2$  a través de sus hojas, por medio de la fotosíntesis, para ser procesado en su interior para producir compuestos a base de carbono en sus tejidos.
- También por la respiración vegetal se libera un poco de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, mientras que otra parte se queda en el suelo o se pasa a los seres vivos que se alimentan de plantas.
- Estos seres vivos utilizan el alimento para generar más materia orgánica (músculo, huesos, órganos, etc.) y posteriormente por medio de la respiración expulsan  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. A su vez, otros seres vivos se alimentan de animales herbívoros, por lo que el proceso se repite.
- Una vez que un ser vivo muere, organismos pequeños descomponen los cuerpos, liberando también  $\text{CO}_2$  y dejando partes en el suelo.
- Esta materia orgánica que queda en el suelo y no se descompone, queda en la litósfera durante miles de años en forma de carbón, petróleo, gas, arrecifes de coral y roca caliza.

Para los procesos de fotosíntesis y respiración, las ecuaciones químicas se presentan a continuación (Pérez, 2017):



Como se puede observar, en el proceso de fotosíntesis las plantas absorben CO<sub>2</sub>, liberando oxígeno y produciendo una molécula orgánica que sirve como base para otros compuestos y procesos químicos.

## **6.2 Servicios ecosistémicos**

El ecosistema es la unidad funcional básica de la naturaleza en donde existe la interacción de componentes bióticos y abióticos, entendiéndose a las sociedades humanas como sistemas complejos que interactúan de forma dinámica con esos ecosistemas, así mismo considerando al ser humano como una especie más (Balvanera & Cotler, 2011).

Boyd y Banzhaf (2007 citado en Balvanera & Cotler, 2007) sugieren definir a los SE como los componentes de la naturaleza que son directamente consumidos, disfrutados o que contribuyen al bienestar humano. De manera sintetizada el término SE hace referencia al conjunto de beneficios que las poblaciones humanas obtienen de los ecosistemas (Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

Por su parte Balvanera & Cotler (2011) definen los SE como el vínculo explícito entre el estado y funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano, donde dicha relación puede ser directa o indirecta, y los seres humanos pueden o no estar conscientes de su existencia.

Existe una clasificación de los tipos de servicios ecosistémicos el cuál fue propuesto por el Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005):

- **Provisión:** Son los productos tangibles que se obtienen directamente de los ecosistemas, algunos ejemplos son el agua dulce, alimentos, fibras (madera, seda, algodón) y/o medicinas naturales.
- **Soporte:** Son los procesos ecológicos básicos que aseguran el funcionamiento adecuado de los ecosistemas y el flujo de servicios de provisión, de regulación y culturales. Algunos ejemplos son la fotosíntesis, ciclo del carbono, del agua, entre otros.
- **Regulación:** Trata del mantenimiento de la calidad del aire y del suelo, el control de las inundaciones y enfermedades o la polinización de cultivos.
- **Cultural:** Son los beneficios intangibles que se puede obtener de los ecosistemas. Estos servicios comprenden la inspiración estética, la identidad cultural, el sentimiento de apego al terruño y la experiencia espiritual relacionada con el entorno natural. Normalmente, en este grupo se incluyen también las oportunidades para el turismo y las actividades recreativas (FAO).

La captura de carbono es un servicio ambiental relacionado con las funciones de regulación ambiental (MASS, 2009 en Carmona, 2017) dado que regula la calidad del aire y de los gases presentes, la composición química de la atmosfera (FAO- OAPN, 2009 en Carmona, 2017).

## **6.3 Valoración de los servicios ecosistémicos**

La valoración económica es un instrumento para calcular el valor de los ecosistemas y de sus servicios en términos monetarios. Se cuantifican los beneficios que proporcionan los



ecosistemas y el impacto que los cambios en dichos ecosistemas producen en el bienestar de las personas (GIZ, 2011).

De acuerdo con la visión económica neoclásica, la valoración es una medida de la capacidad de los ecosistemas para satisfacer necesidades esenciales a la vida, pudiéndose valorar el ecosistema desde distintas perspectivas: una basada en el ser humano y el valor que este le asigna a los bienes y servicios ecosistémicos, y la otra es basada en las características propias de cada ecosistema; esta última considera la valoración cultural, espiritual y religiosa (Bustamante y Ochoa, 2014).

El valor Económico Total (VET) clasifica los distintos tipos de valor económico de los servicios de los ecosistemas, según la vinculación entre los seres humanos y el ecosistema, los cuales se clasifican en las siguientes opciones mostradas en la Figura 1 (Bustamante y Ochoa, 2014):



**Figura 1.** Tomado de Guía práctica para la valoración de servicios ecosistémicos en Madre de Dios.

Fuente: Bustamante, M. y Ochoa, E. (2014).

Los valores de uso directo corresponden a los servicios de los ecosistemas que se utilizan directamente para el consumo o producción. Por su parte los de uso indirecto son los beneficios derivados de las funciones del ecosistema para la producción y consumo actual, como puede ser la filtración de agua y protección de manglares, mientras que los valores de opción están asociados al precio que las personas están dispuestas a pagar por un bien no utilizado, un ejemplo podría ser la cuota de recuperación para visitar un área natural protegida del tipo: parque nacional. Por el lado del valor intrínseco, lo que refiere el valor de existencia se deriva de la satisfacción de saber que los ecosistemas y sus servicios continúan existiendo, aunque las personas no lleguen a visitarlos o usarlo (GIZ, 2011).

Las importancias de una valoración económica de los servicios ecosistémicos son (GIZ, 2011; Jill, 2015):

- Estimar el daño a ecosistemas
- Evaluar impacto de políticas públicas

- Crear mercados para los servicios ecosistémicos
- Crear herramientas de toma de decisiones para la difusión, concientización e importancia de la conservación de los servicios ecosistémicos para con la población.

#### **6.4 Biomasa aérea y métodos para estimarla**

La biomasa aérea, junto con la biomasa subterránea, se entiende como uno de los componentes de la biomasa en general, y comprende la materia orgánica viva que se encuentra en la superficie, lo cual incluye generalmente la vegetación arbórea y de ella el tronco, el tocón, la corteza, las ramas, las semillas y las hojas (FAO, 2004).

Para la estimación de este ítem fueron consultados diversos estudios, en donde fue común el uso de ecuaciones alométricas suministradas por variados autores, los cuales soportan cada una de ellas de acuerdo a la especie que corresponda cada uno de los elementos arbóreos que componen la vegetación del lugar. A continuación, se mencionan algunas de las investigaciones realizadas y las variables que fueron medidas en la vegetación para la estimación de la biomasa aérea.

En su artículo sobre estimación de biomasa de bosques templados con aprovechamiento forestal, Galicia, Saynes y Campo (2015), toman en consideración algunas mediciones para el cálculo de biomasa aérea. Entre éstas se determinaron por parcela la especie de cada árbol, su altura, su diámetro a la altura del pecho (1.30 m), la densidad de los árboles (tallos/Ha), el área basal ( $m^2/Ha$ ) y la biomasa (Mg/Ha). Por último, haciendo uso de ecuaciones alométricas, se utilizó un modelo matemático para cada grupo de especies para calcular la biomasa arbórea.

En el mismo sentido, Domínguez-Cabrera et al. (2009) implementaron para su estudio de bosques el muestreo sobre parcelas que incluían especies de tipo pino y encino. El muestreo incluyó la caracterización de la vegetación arbórea de acuerdo a su diámetro normal, la altura total, la longitud y diámetro de la copa, y el número total de árboles por cuadrante. Una vez obtenidos el número total de árboles y el modelo de peso seco obtenido por la biomasa de cada parcela, se presentaron los datos en el orden de biomasa por unidad de área (tonBiomasa/Ha).

Por otro lado, en el estudio elaborado por Schlegel (2001) en Chile, se sirvió igualmente de ecuaciones alométricas, incluyendo mediciones anteriores para la estimación de la biomasa forestal, tales como diámetro a la altura del pecho, diámetro del tocón y altura total. En este caso se presentan un alto coeficiente de error ajustado y un bajo error estándar de estimación, al igual que supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Por último, se menciona la investigación realizada por He et al. (2013) en los bosques de China. En éste se estima la biomasa aérea a partir de dos métodos: el primero relacionado con la toma de muestras en campo y el segundo a partir de imágenes LIDAR. En el primer procedimiento se utilizaron ecuaciones alométricas a partir de los componentes de la biomasa de los árboles (tronco, ramas, follaje y frutas) de acuerdo a la especie a que perteneciera cada individuo.

La segunda metodología, utilizando imágenes satelitales LIDAR, permitió la representación de la biomasa aérea eliminando los pulsos que llegaron más debajo de la superficie, y dividiendo en dos grupos los restantes, es decir, los que alcanzaron la superficie y los que no. De este modo, se creó un modelo digital del terreno (MDT), del cual se obtuvo una red irregular triangulada, e igualmente de ésta se generó un MDT con resolución espacial de 0.5 m., que permitió hacer comparaciones con las medidas obtenidas en campo, la cual arrojó una diferencia media entre las dos metodologías de 21.8 cm.

### **6.5 Estimación del carbono**

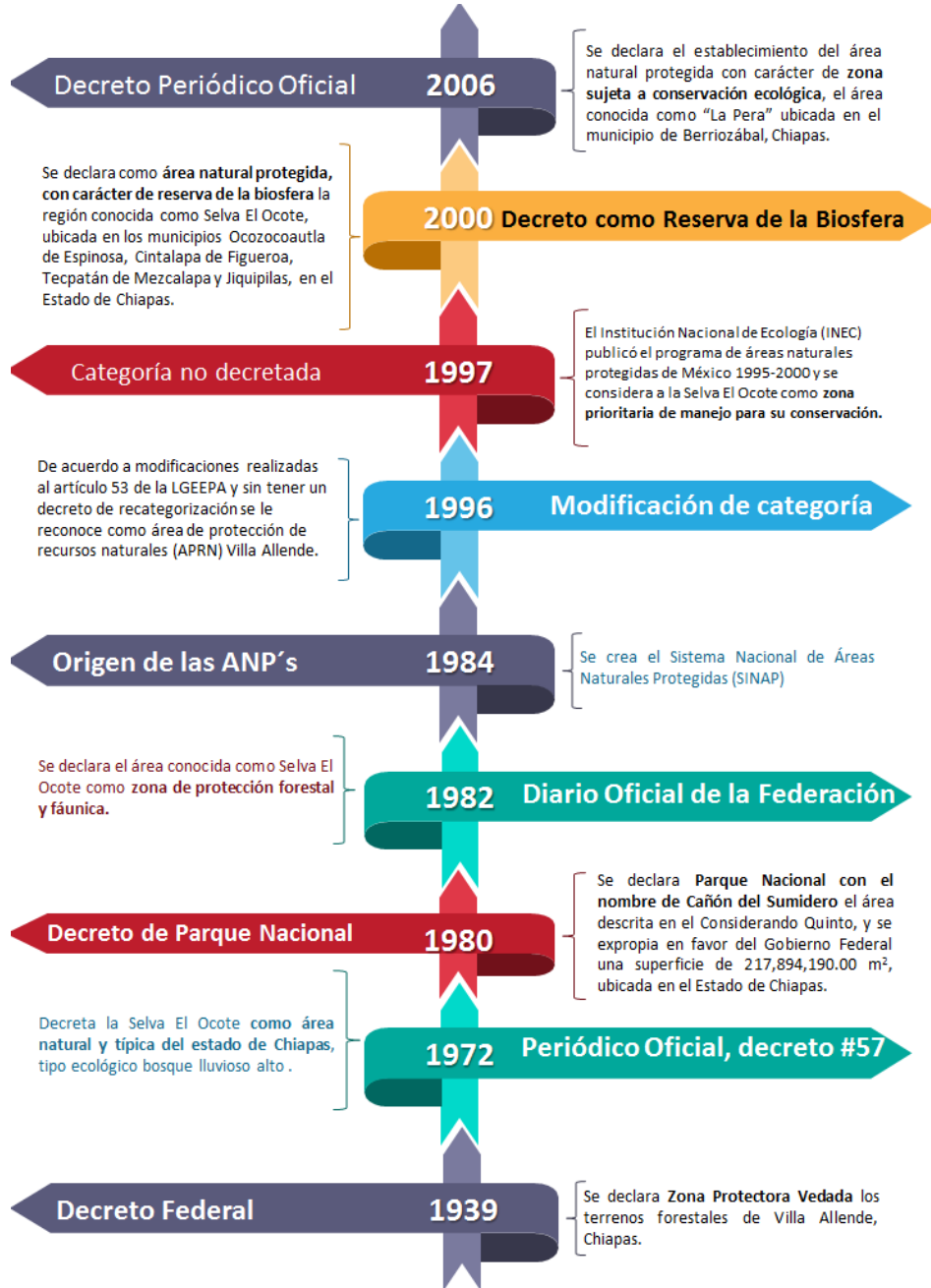
Lograr estimar de manera correcta la biomasa de un bosque, y con esto, la cantidad de carbono que este puede capturar, es de suma importancia para determinar la cantidad de este elemento que, de no existir el bosque, podría liberarse a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> y contribuiría así a incrementar la cantidad de gases de efecto invernadero, o por el contrario, conocer la cantidad que se conserva cuando se busca que el bosque mitigue los efectos de estos gases (Schlegel 2001).

Para estimar la biomasa de un bosque, el método directo sería cortar el árbol para pesar la biomasa y determinar su peso seco posteriormente. Como este método no es viable tanto por la falta de recursos y tiempo como por los daños que ocasionaría, se emplean métodos indirectos que consisten en aplicar ecuaciones y modelos estadísticos para estimar, por medio de variables que se miden en campo, las características del espacio de interés (Ibid.).

Ya que se calculó la biomasa aérea, se procede a calcular el contenido de carbono, que por lo general se asume que corresponde al 50% de la biomasa aérea de los árboles vivos (WWF 2014).

## 7. NORMATIVIDAD

Son variados los periodos de las normas que han formalizado la figura de las cuatro ANP's que conforman el Corredor Biológico Selva el Ocote – Cañón del Sumidero. En la Figura 2 se observa la cronología de dichas normas con su respectiva ordenanza.

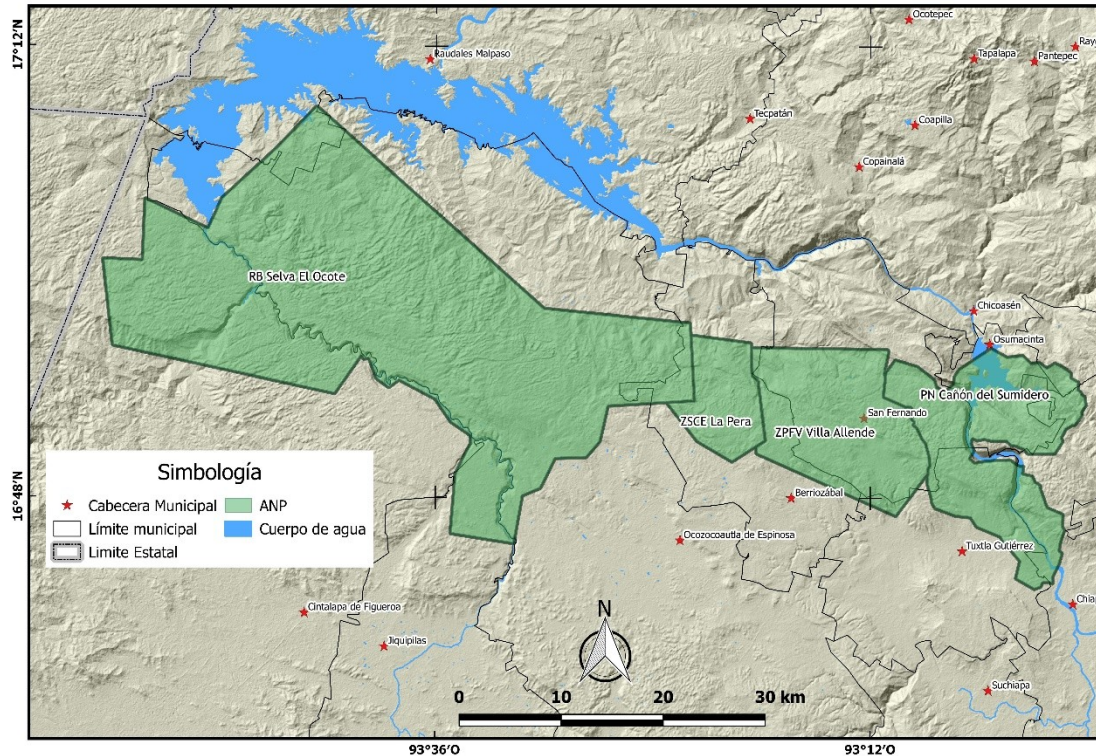


**Figura 2.** Cronología de las normas que rigen las ANP's del Corredor Biológico Selva El Ocote – Cañón del Sumidero.  
Fuente: Autores.

## 8. METODOLOGÍA

### 8.1 Área de Estudio

El área de estudio propuesta para la presente investigación integra cuatro áreas naturales protegidas (ANP) contenidas en el estado de Chiapas, ubicado al sur de México. Las ANP's protegidas corresponden a El Ocote, La Pera, Villa Allende y el Cañón del Sumidero, cuya estructura permite la conformación de un corredor verde en dicho estado que recibe el nombre de Corredor Biológico Selva el Ocote – Cañón del Sumidero. En la Figura 3 se observan las cuatro ANP's y los municipios que las abarcan.



**Figura 3.** Cartografía del área de estudio.

Fuente: Autores.

En primer lugar, la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote (REBISO), se ubica en la zona montañosa de la porción norte del estado de Chiapas y parte de su depresión central. Cuenta con una superficie de 101,288 hectáreas. Se encuentra dentro de los municipios de Ocozocoautla y Cintalapa principalmente, sin embargo, de manera parcial colinda con la parte suroeste de Tecpatán, la porción Noroeste de Berriozábal y la porción norte de Jiquipilas.

La REBISO se encuentra dentro de la región hidrológica No.30 “Grijalva-Usumacinta” la cual nace en Guatemala y recorre el estado de Chiapas en dirección sureste - noroeste, atravesando la Depresión Central, la Altiplanicie y Montañas del Norte, hasta desembocar en el Golfo de México (Mullerried, 1957). A lo largo del curso de este río se han construido cuatro presas hidroeléctricas de gran importancia nacional, siendo éstas Dr. Belisario Domínguez (La Angostura), Peñitas, Ing. Manuel Moreno Torres (Chicoasen), y Netzahualcóyotl (Malpaso). Diversos ríos como el San Andrés y Cintalapa provienen de la

vertiente norte de la Sierra Madre, atraviesan los Valles de los Municipios de Jiquipilas y Cintalapa reuniéndose para formar el río la Venta, al cual se le une posteriormente el río Negro y vierten sus aguas en la presa Netzahualcóyotl. En la parte norte, dentro de la sierra Veinte Casas y Sierra el Sombrerón, se originan varios ríos como el Cacahuanón, Tigre y el Chute Redondo (SEMARNAT, 2001).

En segundo lugar, la Zona Protectora Forestal Vedada de la población de Villa Allende, corresponde a un área natural protegida de 21,000 hectáreas, que abarca los municipios de San Fernando, Tuxtla Gutiérrez y Berriozábal. Es considerada por la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO) como una región prioritaria terrestre y como área de importancia para la conservación de aves (De los Santos, 2014).

En tercer lugar, de acuerdo con el decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 8 de diciembre de 1980, el Parque Nacional Cañón del Sumidero se ubica en la depresión central del estado de Chiapas, abarcando una superficie de 23,491 hectáreas, comprendiendo los municipios en su porción noreste de Tuxtla Gutiérrez, el lado noroeste de Chiapa de Corzo, San Fernando, casi en su totalidad del municipio de Osumacinta y una pequeña porción del sur-suroeste de Soyaló. El principal afluente del área es el río Grijalva el cuál atraviesa de sur a norte el área, sin embargo, existen afluentes menores, y dado las características kársticas se puede hablar de múltiples afluentes subterráneos.

Por último, la Zona Sujeta a Conservación Ecológica La Pera, cuenta con un área de 7,506 hectáreas, que se distribuye en el municipio de Berriozábal. Se ubican para esta zona en esencia tres tipos de suelo, que comprenden luvisol, acrisol y litosol, formando una topografía de cañadas que varían de una altura de 500 a 1.000 msnm (Periódico Oficial, 2006). Respecto a la vegetación, esta área se caracteriza por ser de selva alta, con unidades exuberantes que sobrepasan los 30 metros. Cabe destacar que La Pera constituye un corredor biológico entre EL Parque Nacional Cañón del Sumidero y la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote.

En las tablas 1, 2 y 3 se muestra información relacionada a la caracterización edafológica, climática y de la vegetación de las cuatro ANP's.

ANP	Cambisol	Leptosol	Luvisol	No Aplica	Phaeozem	Plintoso	Regoso	Umbriso	Vertisol	Total
Cañón del Sumidero	/	13909.25	3187.25	1858.28	29.08	/	4507.91	/	/	23491.77
%	/	59.21	13.57	7.91	0.12	/	19.19	/	/	100
El Ocote	/	17562.78	35764.21	142.57	41391.27	102.76	/	6207.27	94.66	101265.5
%	/	17.34	35.32	0.14	40.87	0.10	/	6.13	0.09	100
La Pera	/	1890.7	5615.92	/	/	/	/	/	/	7506.62
%	/	25.19	74.81	/	/	/	/	/	/	100
Villa Allende	/	14726.79	3817.82	218.96	354.22	/	297.21	/	465.95	19880.95
%	/	74.07	19.20	1.10	1.78	/	1.49	/	2.34	100
TOTAL	22.6	48089.53	48385.21	2219.81	41774.57	102.76	4805.12	6207.27	560.62	152167.5
%	0.01	31.60	31.80	1.46	27.45	0.07	3.16	4.08	0.37	100

**Tabla 1.** Caracterización edafológica de las áreas naturales protegidas (Fuente: INEGI, 2006).  
Fuente: Autores.

ANP	Cálido húmedo	Cálido subhúmedo	Semicálido húmedo	Semicálido subhúmedo	Total
Cañón del Sumidero	21002.2	/	2489.52	/	23491.76
%	89.40	/	10.60	/	100.00
El Ocote	73784.4	22724.28	/	4779.46	101288.1
%	72.85	22.44	/	4.72	100.00
La Pera	2675.94	4830.67	/	/	7506.61
%	35.65	64.35	/	/	100.00
Villa Allende	207.76	19673.19	/	/	19880.95
%	1.05	98.95	/	/	100.00
TOTAL	76668.1	68230.38	112.29	7156.69	152167.5
%	50.38	44.84	0.07	4.70	100.00

**Tabla 2.** Caracterización climática de las áreas naturales protegidas.  
Fuente: INEGI, 1980.

ANP	Agricultura	Urbano	Bosque de encino	Bosque secundario	Cuerpo de agua	Sin vegetación	Pastizal	Sabanoide	Selvas primarias	Selvas secundarias	Sin vegetación aparente	TOTAL
Cañón del Sumidero	3451	1824	970	/	1240	298	4494	/	/	10684	530	23491
%	14.69	7.76	4.13	/	5.28	1.27	19.13	/	/	45.48	2.26	100
El Ocote	376	/	311.57	343.95	142.34	/	11083.4	7228.7	26721.32	55080.85	/	101288.1
%	0.37	/	0.31	0.34	0.14	/	10.94	7.14	26.38	54.38	/	100
La Pera	62.08	/	/	75.53	/	/	2384.09	/	1188.27	3796.67	/	7506.64
%	0.83	/	/	1.01	/	/	31.76	/	15.83	50.58	/	100
Villa Allende	3323.71	326.42	/	187.6	/	/	5979.82	/	139.45	9923.96	/	19880.96
%	16.72	1.64	/	0.94	/	/	30.08	/	0.70	49.92	/	100
TOTAL	7214.24	2150.2	311.57	1577.35	1383.03	297.6	23940.8	7228.7	27844.56	79689.34	530.15	152167.5
%	4.74	1.41	0.20	1.04	0.91	0.20	15.73	4.75	18.30	52.37	0.35	100

**Tabla 3.** Caracterización de la vegetación de las áreas naturales protegidas.  
Fuente: INEGI, 2012.

Por otro lado, en la Tabla 4 se muestra la cantidad de población de acuerdo a los municipios donde se encuentran inscritas las ANP's:

ANP	Municipio	Número de habitantes
El Ocote	Ocozacoautla de Espinosa	92,103
	Cintalapa	84,455
	Tecpatán	41,305
El Ocote, Villa Allende, La Pera	Berriozábal	51,722
El Ocote	Jiquipilas	39,109
Villa Allende	San Fernando	39,204
Villa Allende, Cañón del Sumidero	Tuxtla Gutiérrez	598,710
Cañón del Sumidero	Chiapa de Corzo	100,751
	San Fernando	39,204
	Osumacinta	3,682
	Soyaló	10,707

**Tabla 4.** Cantidad de población por municipio.  
Fuente: INEGI, 2015.



Del mismo modo, se agregó la población asociada a cada ANP, la cual se estableció de acuerdo a las localidades:

<b>ANP</b>	<b>Localidades</b>	<b>Población</b>
Reserva de la Biosfera Selva El Ocote	137	8,015
Zona Sujeta a Conservación Ecológica La Pera	43	1,699
Área de Protección de Recursos Naturales Villa Allende	106	29,159
Parque Nacional Cañón del sumidero	40	52,672

**Tabla 5.** Cantidad de población por localidades asociadas a las ANP's.

Fuente: INEGI, 2015.

## 8.2 Materiales

Los datos y herramientas requeridas para el procesamiento de la información se encuentran mencionados en la tabla 6.

<b>Insumos</b>	<b>Herramientas (software, paqueterías, etc.)</b>
Información dasométrica, del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2009). Conjunto vectorial de uso de suelo y vegetación: Serie II (1993) y IV (2007) de uso de suelo y vegetación de INEGI. Conjunto vectorial de red de caminos y localidades (INEGI, 2010), marco geoestadístico 2016 Modelo Digital de Elevación (Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0). Pendientes del terreno (derivado del MDE). Modelo digital de alturas del dosel (Global Forest Canopy Height).	SIG: QGIS 10.14.20, ArcGIS 10.2. Otros: TerrSet Paquetería: Word, Power Point, Excel, Photoshop, Illustrator.

**Tabla 6.** Materiales.

Fuente: INEGI, 2015.

## 8.3 Metodología

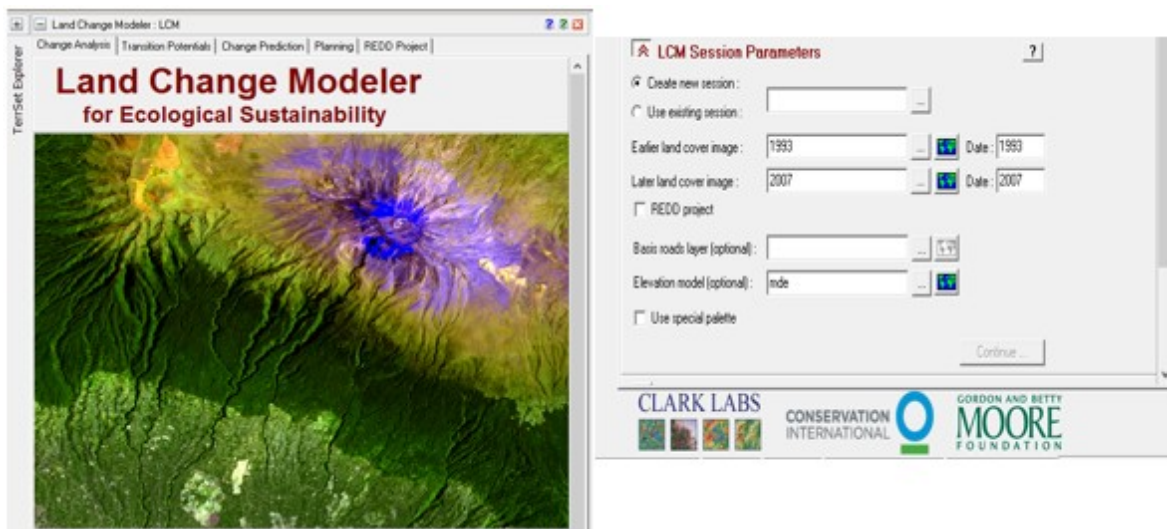
### 8.3.1 Cambio de uso de suelo

Para la detección del cambio de uso de suelo se realizó una reagrupación de las clases que ya están establecidas para las capas de uso de suelo y vegetación, serie II y IV de INEGI, esto con la finalidad de tener clases homologadas en ambos conjuntos de datos. En la Tabla 7 se muestra la agrupación resultante de las clases:

Clase Original	Clase homologada
Agricultura (de riego y humedad) Agricultura de temporal	Agricultura
Asentamientos humanos	Asentamientos humanos
Bosque de coníferas primario Bosque de coníferas-latifoliadas primario Bosque de latifoliadas primario Bosque mesófilo de montaña primario	Bosques primarios
Bosque de coníferas secundario Bosque de coníferas-latifoliadas secundario Bosque de latifoliadas secundario Bosque mesófilo de montaña secundario	Bosques secundarios
Cuerpo de agua Área sin vegetación aparente	Otros
Pastizal inducido o cultivado Pastizal natural	Pastizales
Selva caducifolia y subcaducifolia primario Selva perennifolia y subperennifolia primario	Selvas primarias
Selva caducifolia y subcaducifolia secundario Selva perennifolia y subperennifolia secundario	Selvas secundarias

**Tabla 7.** Homologación de clases de uso de suelo, series II y IV.

Como se muestra en la Figura 3, el primer paso que se realizó fue detectar el cambio de uso de suelo entre los años 1993 y 2007, considerando las series II y IV de uso de suelo y vegetación de INEGI, para lo cual se realizó un recorte de la región correspondiente a todos los municipios que ocupa el corredor biológico. Así también se consideró el modelo digital de elevación.



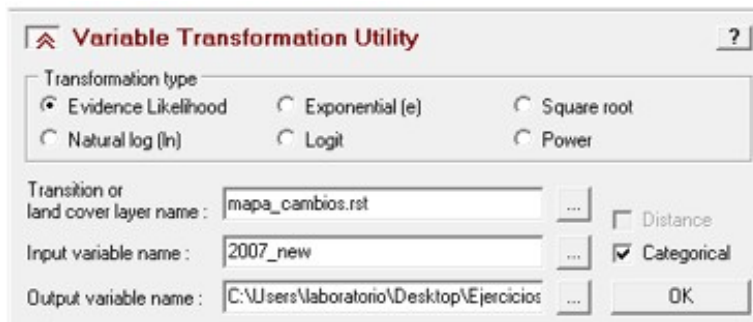
**Figura 3.** Detección de cambios de uso de suelo.

Posteriormente, se crea un mapa de cambios y a partir del procedimiento anterior, del cual se obtuvieron los diferentes sub-modelos (que son las transiciones de un uso de suelo a otro), obteniendo dos sub-modelos, uno de pérdida y otro de ganancia, tal como se muestra en la Tabla 8.

Resultado del comportamiento de pérdidas y ganancias	
Sub-modelo: Ganancia	Sub-modelo: Pérdida
Agricultura → Selvas Secundarias Pastizales → Selvas secundarias	Bosques primarios → Bosques secundarios Selvas primarias → Selvas secundarias Selvas secundarias → Agricultura Selvas secundarias → Pastizales

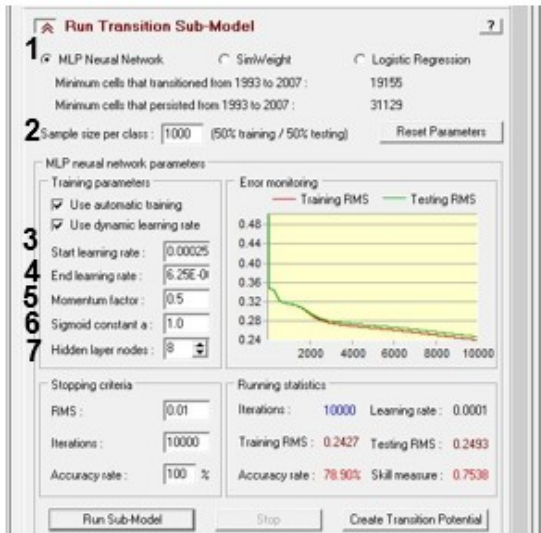
**Tabla 8.** Resultados de las clases en los sub-modelos de pérdida y ganancia.

A partir de aquí, se realizan los siguientes procedimientos para obtener una proyección del cambio de uso de suelo, que para este caso es el año 2021. Dados los objetivos del trabajo, se evaluaron los sub-modelos de pérdida, al igual que se crea una capa de la variable de transformación (Figura 4).



**Figura 4.** Variable de transformación.

Se consideraron cinco *drivers*, los cuales fueron: distancia a carreteras, distancias a localidades (ponderando por número de habitantes), modelo digital de elevación, pendiente del terreno y probabilidad de cambio de uso de suelo. Para obtener una proyección al año 2021, se eligió modelar por el método de *MLP Red Neuronal*, estableciendo los parámetros que se muestran en la Figura 5.



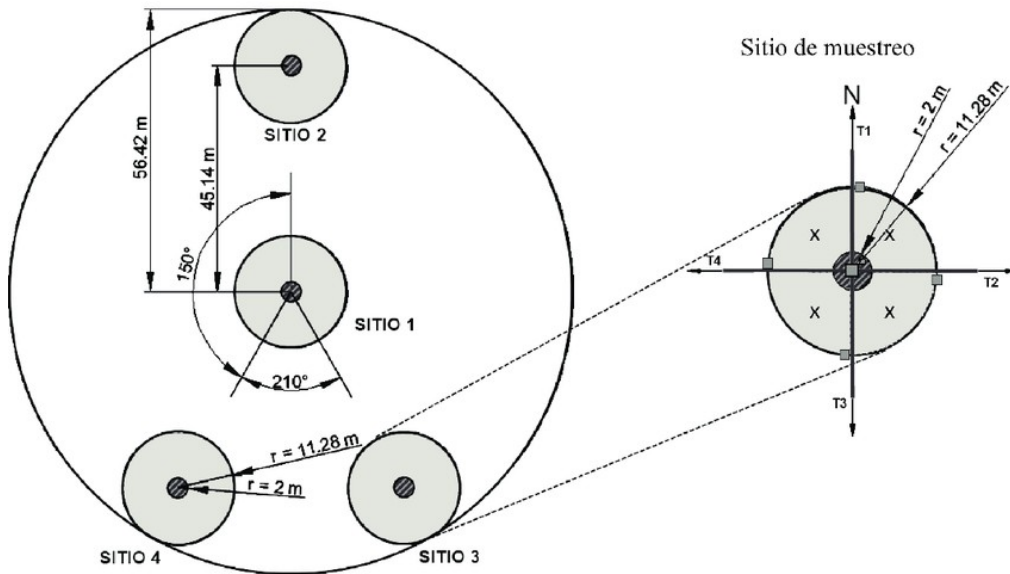
1. Método del modelado de transición Multi-Layer Perceptron (MLP) Neural Network
2. Tamaño de la muestra, de acuerdo a experiencias el tamaño más óptimo es 10,000, esto para tener 50% para entrenamiento y el otro 50% para la evaluación
3. Tasa inicial de aprendizaje = 0.00025
4. Tasa Final de aprendizaje =  $6.25 \times 10^{-5}$
5. Factor de Impulso = 1.0
6. Constante sigmoideo
7. Nodos de la capa oculta = 8

**Figura 5.** Parámetros para estimación del modelo de transición.

De acuerdo a estudios previos donde se aplicó el mismo procedimiento con Terrset, como en Narayan et al. (2014), se determinó que los valores adecuados tanto para el porcentaje de exactitud como para el error cuadrático (RMS), corresponden a  $>50\%$  y  $RMS < 0.25$  respectivamente. Una vez logrados los resultados bajo los anteriores parámetros, se obtienen los mapas de zonas de transición en potencia, los cuales serán insumo para calcular la cantidad de cambio que puede ocurrir en un futuro usando el proceso de predicción de cadenas de Markov, el cual establece la cantidad de cambio de un uso de suelo a otro desde la fecha posterior (serie IV de INEGI) a la fecha de predicción (2021), basada en una proyección de los potenciales de transición hacia el futuro.

### 8.3.2 Estimación del carbono

Para la estimación del carbono de la biomasa aérea, se utilizó la información dasométrica a partir del inventario forestal [2013-2014-2004-2009](#) de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) [mediante la aplicación de ecuaciones alométricas](#). La información se presenta para distintos sitios, que es la subunidad de un conglomerado. Un conglomerado está compuesto por 4 sitios, cada uno de los cuales corresponde a una superficie de  $400\text{m}^2$  y están separados 45.14 m entre ellos. De esta manera, el radio del círculo del conglomerado es equivalente a 56.42 m, por lo que el área en la que están circunscritos los sitios corresponde a una hectárea (Ha).



**Figura 6.** Diseño del conglomerado.  
Fuente: Bolaños-González et al. (2017).

Con esta información se procedió a calcular la cantidad de biomasa aérea para cada sitio, aplicando las ecuaciones alométricas propuestas por Ayala en 1998 (Jong et al., 2006), dependiendo de la vegetación que se trate, coníferas o latifoliadas:

$$\text{Coníferas} = (0.058) * (((DN^2) * HT)^{0.919}) / 1000$$

$$\text{Latifoliadas} = (0.283) * (((DN^2) * HT)^{0.807}) / 1000$$

Siendo DN el diámetro normal y HT la altura total, para cada individuo de la muestra.

Con el valor de la biomasa, se procedió a calcular el contenido de carbono, que por convención se estima en el 50% del total de la biomasa aérea de los árboles vivos (WWF, 2014), por lo que los resultados antes mencionados se multiplicaron por 0.5. Se sumó el carbono de cada individuo para obtener el correspondiente a cada sitio, y posteriormente se sumaron los sitios de cada conglomerado.

Debido a que la resolución espacial con la que se trabaja con los insumos es de 100x100m, resultó ideal estimar la cantidad de carbono por Ha. Para esta estimación se empleó la metodología propuesta por Smelko y Merganic (2008):

$$\hat{R} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i}$$

La fórmula es un promedio de razones, en la que el numerador corresponde al total de carbono de los sitios dentro del conglomerado, y el denominador corresponde al área de estudio. Por lo tanto, si hubo información de 4 sitios para el conglomerado, el área será 0.16, y si únicamente hubo información de un sitio para un conglomerado, entonces el

área será 0.04, considerando también los casos de información de 2 y 3 sitios en un conglomerado.

Posteriormente se procedió a la modelación espacial del carbono en el área de estudio. ~~Para estimar el carbono almacenado, se utilizará el conjunto de datos vectoriales de unidades edafológicas, serie I, escala 1:250000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para lo cual se calcula la densidad aparente del suelo (DAS), a partir del método propuesto por Schargel y Delgado (1990) con la información de rangos de textura: suelos arcillosos ( $DAS= 1.15 \text{ Mg m}^{-3}$ ), suelos francos ( $DAS= 1.4 \text{ Mg m}^{-3}$ ) y suelos arenosos ( $DAS= 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Posteriormente se aplica la fórmula propuesta por Deng et al (2011), la cual hace una estimación del carbono en el suelo a partir de la densidad aparente:~~



~~Donde  $D_{SCD}$  es la densidad de carbono en el suelo ( $\text{Mg ha}$ ),  $p$  es la densidad aparente del suelo,  $P_{SOG}$  es el % de materia orgánica en el suelo y  $B_f$  es el factor de Bemmelen, para el cual se toma un valor de 0.58~~ Se contempló el método bivariado de regression-kriging para la modelación, ya que diversos autores han encontrado que este método captura de mejor manera la estructura espacial de los datos muestra frente a otros métodos geoestadísticos (Hengl et al., 2004; Meng, 2014; Bajat et al., 2013; Karl, 2009; Yongkai et al., 2015).

Los insumos que se utilizaron para poder realizar la regresión fueron los puntos georreferenciados de los conglomerados con la información del carbono para cada uno, y una imagen LiDAR de resolución espacial de 1km con datos del *Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)* de 2005 a bordo del *Ice, Cloud, and land Elevation Satellite (ICESat)*, con las alturas del dosel de la región, obtenido a través de la herramienta de la NASA, *Spatial Data Access Tool* (Simard et al., 2011).

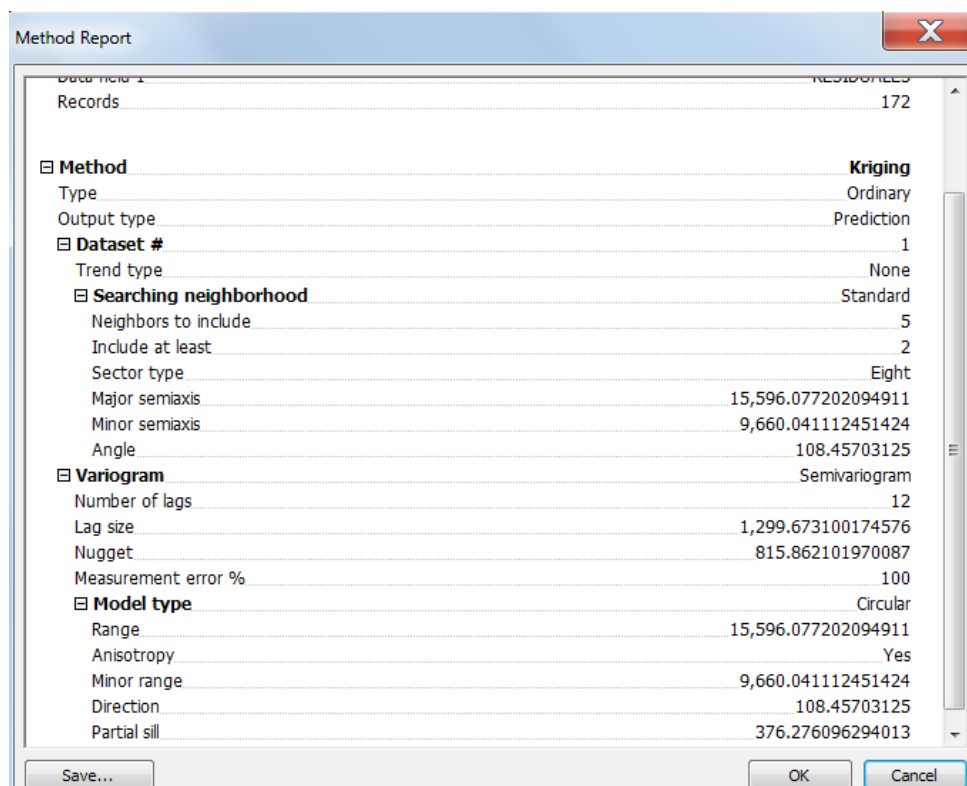
El coeficiente de correlación que se obtuvo entre el carbono y las alturas fue de 0.56, y la ecuación de la recta de ajuste:

$$C = 3.4089 h - 37.101$$

Donde  $C$  es el carbono y  $h$  la altura.

Es con los residuales (la diferencia entre el carbono real de cada conglomerado y el carbono estimado obtenido con la ecuación de regresión) que se procedió a realizar la interpolación para espacializar la distribución de carbono en el área de estudio, utilizando el kriging ordinario en ArcGIS.

Los parámetros que se contemplaron para realizar la interpolación se muestran a continuación:



**Figura 7.** Parámetros contemplados para la interpolación.

Para estimar el carbono en el año 2007, se sumó el resultado de la interpolación al continuo obtenido de la aplicación de la fórmula de regresión al modelo de alturas del dosel y restando a esto todo lo que no fuera vegetación dentro del área de estudio.

Finalmente, para estimar el carbono para el año 2021 se utilizó la tasa de acumulación de biomasa de acuerdo al tipo de vegetación que Jong et al. (2006) propusieron, refiriéndose a incrementos anuales de biomasa, que están en función del tipo de vegetación y la cantidad de lluvia que existe. La cantidad de carbono que se contempló, de acuerdo al tipo de bosque que se contempla con el modelo prospectivo, con y sin restricciones, se muestra a continuación:

Tipo de bosque	Acumulación de carbono para 2021
Bosque de encino-primario	19.88
Bosque de encino-secundario	23.24
Selva subcaducifolia-primaria	34.09
Selva subcaducifolia-secundaria	34.44

**Tabla 9.** Tasa de acumulación de carbono.

Fuente: Jong et al. (2006).

Al resultado de la distribución del carbono para 2007 se le sumó lo contemplado por la tasa de acumulación de biomasa, tanto para el escenario en el que no se contemplaron restricciones como para el que sí las contempló.

### 8.3.3 Estimación económica del carbono almacenado

De acuerdo a la revisión bibliográfica, se hallaron dos métodos para la cuantificación monetaria del potencial de carbono que se almacenó en el periodo del 2007 y en el periodo proyectado, el 2021. Los métodos consultados utilizan uno por su parte el dólar como referente, mientras que el otro estima el valor en pesos mexicanos.

Por parte de las organizaciones gubernamentales en México, en el año 2004 se estableció el *Programa para desarrollar el mercado de servicios ambientales por captura de carbono y los derivados de la biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de sistemas agroforestales*, también conocido por sus siglas PSA-CABSA (Diario Oficial, 2004). En este programa se determina que a partir de su año de publicación, el pago que recibirán los beneficiarios se realizará anualmente y se distribuirá en un periodo de 5 años.

En su anexo 4, este programa estipula que la cantidad a pagar por tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>), es decir, la unidad de referencia para el mercado de bonos de gases de efecto invernadero, está sujeta a una serie de criterios ambientales y sociales del contexto donde se desarrolle el proyecto. Sin embargo, plantea un precio base de \$50 pesos MXN, y de acuerdo al cumplimiento de dichos criterios, tendrá un pago máximo por tonelada de \$100 pesos MXN.

Por otro lado, Nordhaus (2016) en su revisión del costo social del carbono (SCC), utiliza el modelo DICE (Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy) como medio para estimar el SCC. El SCC es entendido por el autor como el costo económico causado por la emisión de una tonelada adicional de CO<sub>2</sub> o un gas equivalente a la atmósfera. El modelo que estima el SCC toma en consideración el ciclo del carbono y los impactos generados por las emisiones, tanto desde una perspectiva climática como de los prejuicios causados a la economía.

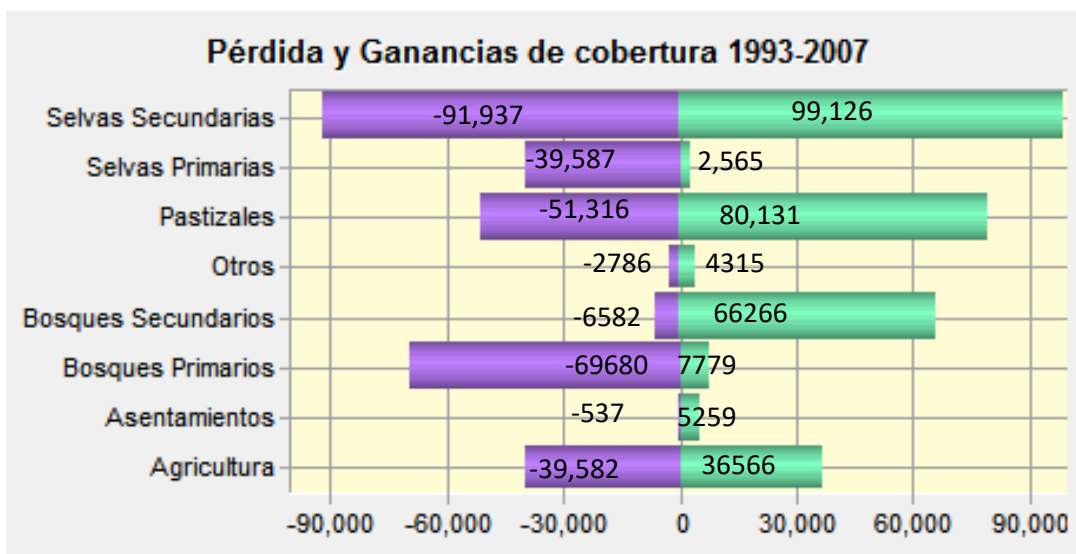
De este modo, los resultados del modelo DICE basados en la actual política ambiental, estimó para el año 2015 un valor de \$31.2 USD por tonelada de CO<sub>2</sub>, con un aumento de 3% anual en términos reales hasta el año 2050. Del mismo modo, las *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine* (2017) determinan un incremento promedio del 3% anual en el precio del SCC, con una media relativamente aproximada al costo por tonelada que señala Nordhaus.

## 9. RESULTADOS

### 9.1 Cambio de uso de suelo

A partir de la comparación y análisis de la Serie II (1993) y IV (2007) de uso de suelo de INEGI, el cual fue analizado y procesado con el software TerrSet para detectar los cambios de coberturas mayores a 10,000 hectáreas a nivel regional, arrojó el resultado de pérdida (tono morado) y ganancia (verde) (Figura 8), para el cual los resultados más significativos se refieren a la gran pérdida de bosques primarios, que supera las 60 mil hectáreas y cuya ganancia no es mayor a 10 mil hectáreas. Por el contrario, el caso de los bosques secundarios la ganancia es mayor a la pérdida, mientras que la categoría de selvas secundarias tiene un balance de 7,189 hectáreas porque la pérdida y ganancia son similares, sin embargo un punto que cobra relevancia es la ganancia de cobertura para la clase de pastizales.





**Figura 8.** Ganancia (verde) y pérdida (morado) de cobertura por hectárea de 1993 a 2007.  
Fuente: autores.

## 9.2 Modelación prospectiva

Para el apartado de proyección a 2021, se consideró usar los siguientes *drivers*: distancia a carreteras, distancias a localidades (ponderando por número de habitantes), modelo digital de elevación, pendiente del terreno (MDE) y probabilidad de cambio de uso de suelo, para los cuales se calculó el coeficiente V de Cramer, el cual indica el grado en que cada variable explicativa (*driver*) está asociada a la distribución de los diferentes usos de suelo, con lo cual se obtuvo lo mostrado en la Tabla 10.

Clases	Probabilidad de cambio	Distancia a carreteras	Distancia a localidades	MDE	Pendientes
Overall V	0.5391	0.1749	0.1443	0.3341	0.2137
Asentamientos humanos	0.7478	0.3271	0.2299	0.3619	0.3988
Selva primaria	0.6231	0.0740	0.0937	0.2878	0.1097
Selva secundaria	0.6200	0.2211	0.2868	0.0761	0.1304
Bosque secundario	0.6139	0.1703	0.1435	0.2105	0.1702
Pastizales	0.6118	0.1754	0.0454	0.7606	0.3511
Otros	0.4998	0.1514	0.1285	0.2907	0.1683
Bosque primario	0.2528	0.1575	0.0290	0.1511	0.1102
Agricultura	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

**Tabla 10.** Resultados del coeficiente V de Cramer.

Se puede observar que la variable explicativa de mayor significancia estadística es la de probabilidad de cambio de uso, ya que de acuerdo con Eastman (2012); Galeana et al.

(2017), los coeficientes V de Cramer mayores a 0.20 son óptimos para evaluar el impacto por cambio de cobertura. Dicho esto, la clase de asentamientos humanos es la variable que responde de mejor manera, seguido por la clase de bosques secundarios, en menor proporción pero sin dejar de ser importante. Las clases de pastizales y bosques primarios tienen buena significancia.

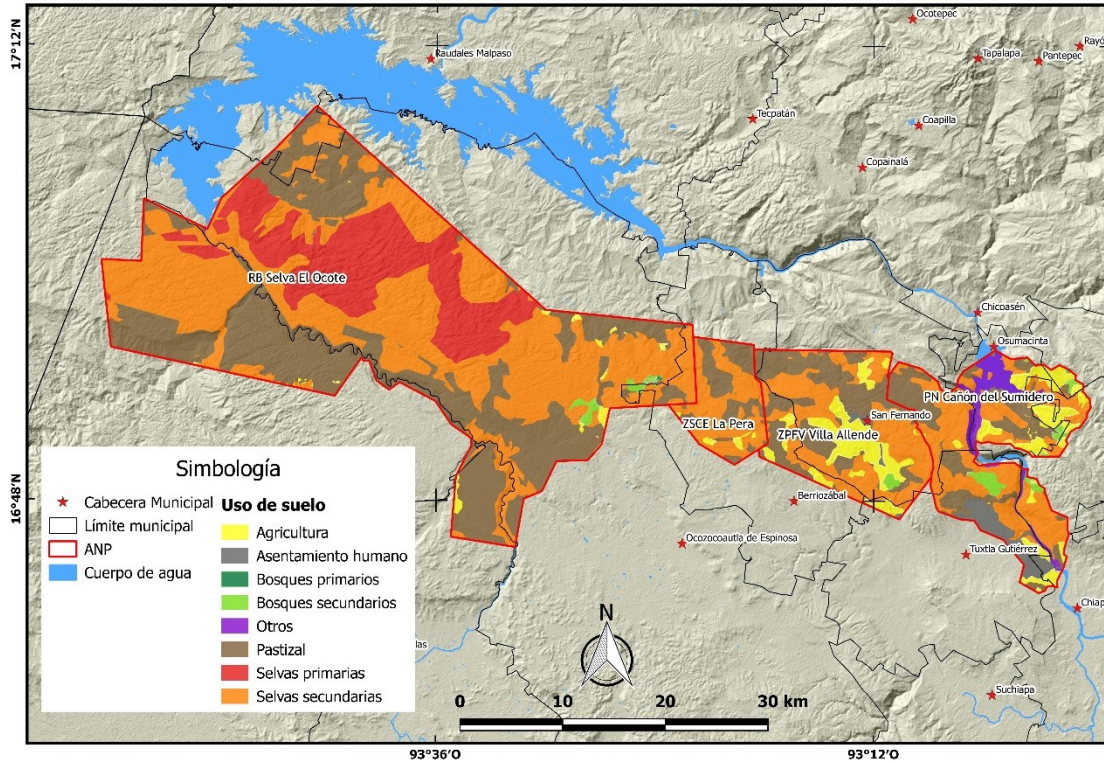
A partir de lo obtenido, se corrió el modelo para la proyección por redes neuronales (MLP) donde se probó ejecutar con diferentes parámetros, obteniendo un porcentaje de exactitud de 77.06% y error cuadrático medio (RMS) de 0.21. Posteriormente se obtuvieron las cuatro transiciones más significativas que fueron: Bosques primarios a Bosques secundarios, Selvas primarias a Selvas secundarias, Selvas secundarias a Agricultura, Selvas secundarias a Pastizales, es decir, el modelo consideró todas las transiciones que pasan de un uso de suelo forestal (vegetación natural) a un uso agrícola-agropecuario.

Otro paso fundamental para conocer el cambio de cobertura es la aplicación de cadenas de Markov, que se obtienen a partir de los mapas de cambios y la probabilidad de cambio/transición, calculadas anteriormente. Este procedimiento generó una matriz de áreas de transición (Tabla 11) y un conjunto de imágenes de probabilidad condicional, a partir del análisis de la series II y IV de uso de suelos y vegetación.

	<b>Agricultura</b>	<b>Asentamiento humano</b>	<b>Bosques primarios</b>	<b>Bosques secundarios</b>	<b>Otros</b>	<b>Pastizal</b>	<b>Selvas primarias</b>	<b>Selvas secundarias</b>
<b>Agricultura</b>	0.7914	0.0172	0.018	0.0192	0.0037	0.0496	0	0.1009
<b>Asentamiento humano</b>	0.0532	0.9373	0	0.0001	0.0011	0.0019	0	0.0064
<b>Bosques primarios</b>	0.0438	0.0001	0.4759	0.4036	0.0003	0.0468	0.0011	0.0283
<b>Bosques secundarios</b>	0.1207	0.0007	0.012	0.7416	0.0001	0.0696	0.001	0.0543
<b>Otros</b>	0.0048	0.0001	0.0023	0.0005	0.9163	0.0357	0.0023	0.038
<b>Pastizal</b>	0.0287	0.0015	0.0115	0.0196	0.0085	0.7375	0.0043	0.1882
<b>Selvas primarias</b>	0.0016	0.0001	0.0001	0.0007	0.0015	0.0367	0.4402	0.5191
<b>Selvas secundarias</b>	0.0823	0.0063	0.0067	0.0196	0.0069	0.2275	0.0057	0.645

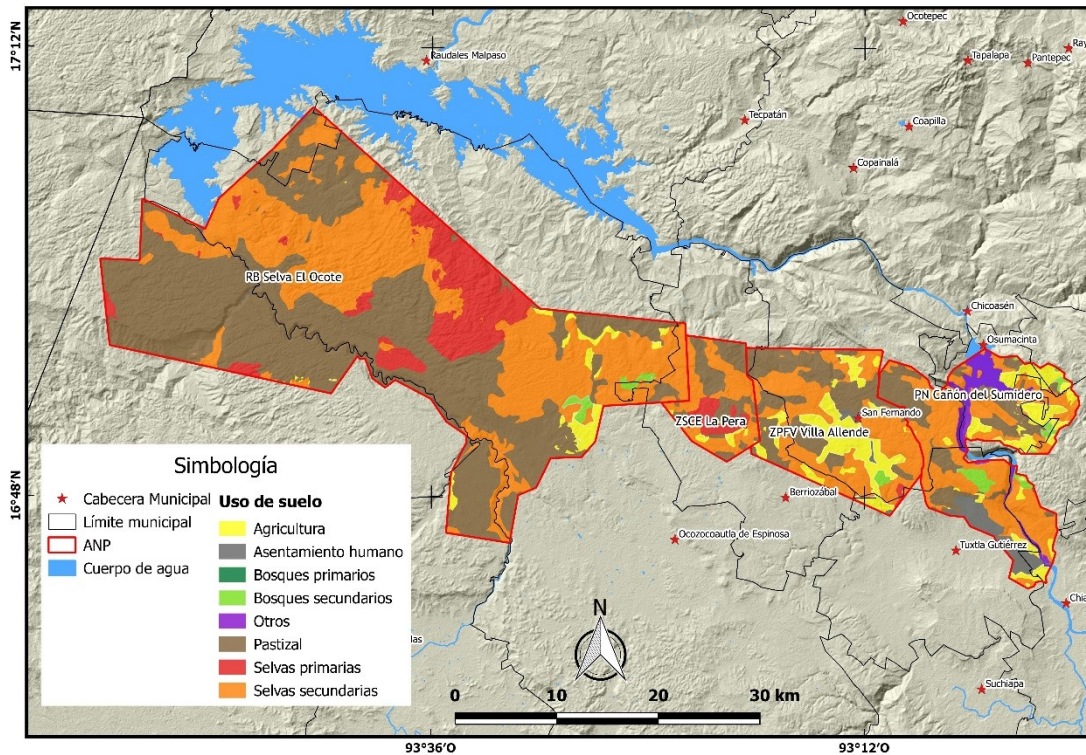
**Tabla 11.** Matriz de área de transición.

El último paso consistió en general los mapas de proyección de uso de suelo y vegetación para el año 2021, donde se consideraron dos escenarios, el primero en función de supuestos, donde se asignó valor de 1 a las zonas de restricción como la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote, 0.5 para el resto de zonas dentro de las ANP's y 0 para el resto de la región. Se obtuvo lo mostrado en la Figura 9.



**Figura 9.** Mapa de la proyección de uso de suelo considerando restricciones.

El segundo supuesto, fue considerando un escenario donde no existieran restricciones, es decir, que toda la superficie contenida dentro del corredor biológico podía estar sometida a cambios de coberturas, para lo cual se obtuvo lo mostrado en la Figura 10.



**Figura 10.** Mapa de la proyección de uso de suelo sin restricciones.

En la Tabla 12 se muestra las cifras de las superficies en hectáreas de cada conjunto de dato: serie II, IV, 2021 sin restricción, 2021 con restricción, donde se puede discutir lo siguiente:

CLASES	Serie II (1993)	Serie IV (2007)	Proyección 2021 con Restricción	Proyección 2021 sin Restricción
Agricultura	5,495.15	2,141.70	8,742.36	10,533.87
Asentamiento humano	775.18	7,209.96	2,148.53	2,147.44
Bosques primarios	1,081.61	311.56	43.55	0.68
Bosques secundarios	752.57	2,215.89	1,849.73	1,894.88
Otros	1,395.62	31,180.62	2,196.53	2,207.63
Pastizal	25,754.85	28,202.26	50,401.49	66,592.59
Selvas primarias	59,695.02	79,328.50	19,549.80	11,845.47
Selvas secundarias	57,220.50	1,580.02	67,433.01	56,947.94

**Tabla 12.** Superficies en hectáreas por uso de suelo del corredor biológico.

Para la proyección a 2021, considerando restricciones en el corredor biológico, existe la tendencia de poder disminuir de manera significativa los usos de suelos dedicados a actividades agrícolas-agropecuarias, así como los incrementos de usos de suelos forestales, destacando la clase de bosques primarios y selvas secundarias, esto en comparación a lo obtenido en la proyección a 2021 sin restricción. A manera de resumen, en el escenario de restricción lo que se pierde de usos agrícolas-agropecuarias se gana

en coberturas forestales, caso contrario para el escenario sin restricción donde el total de vegetación (bosques y selvas) que se puede perder, es similar al total de superficie de sistemas productivos (agricultura y pastizal).

### 9.3 Estimación del carbono

Se realizó un conteo por especie y género de la información dasométrica, teniendo un total de 6,666 individuos muestreados con datos como su altura total, diámetro a la altura de pecho (DAP), coordenadas, entre otros. Se clasificaron de acuerdo al tipo de vegetación, obteniendo que 542 individuos son coníferas y los 6,124 restantes son latifoliadas. En la figura 11 se muestran las especies más numerosas, con más de 50 individuos del total muestreado.



**Figura 11.** Conteo por género de individuos muestreados dentro del área de estudio.

Como primer resultado, se confirma que la altura de los árboles está correlacionada con la cantidad de biomasa aérea que capturan, así como lo mencionan en sus trabajos Ferrere

et al. (2014) y Vásquez et al. (2012), aunque mencionan que la mayor correlación se da entre el DAP y la biomasa, y, por su parte, Chou et al. (2012) mencionan que el DAP y la altura total del árbol están altamente correlacionadas, y a su vez estas están relacionadas con la cantidad de biomasa aérea. En este sentido, se obtuvo, por ejemplo, que el conglomerado con mayor cantidad de carbono tiene 257.86 MgC/Ha, con una altura correspondiente de acuerdo al modelo continuo descargado a 32m, contra la menor cantidad de carbono de un conglomerado correspondiente a 0.48 MgC/Ha a una altura de 14m, y una media para los 172 conglomerados de 33.06 MgC/Ha correspondiente a una altura media de 20m.

Para 2007, la estimación de carbono para la región (municipios que contienen a las ANP's del Corredor) y para cada una de las ANP's del corredor, se presentan a continuación:

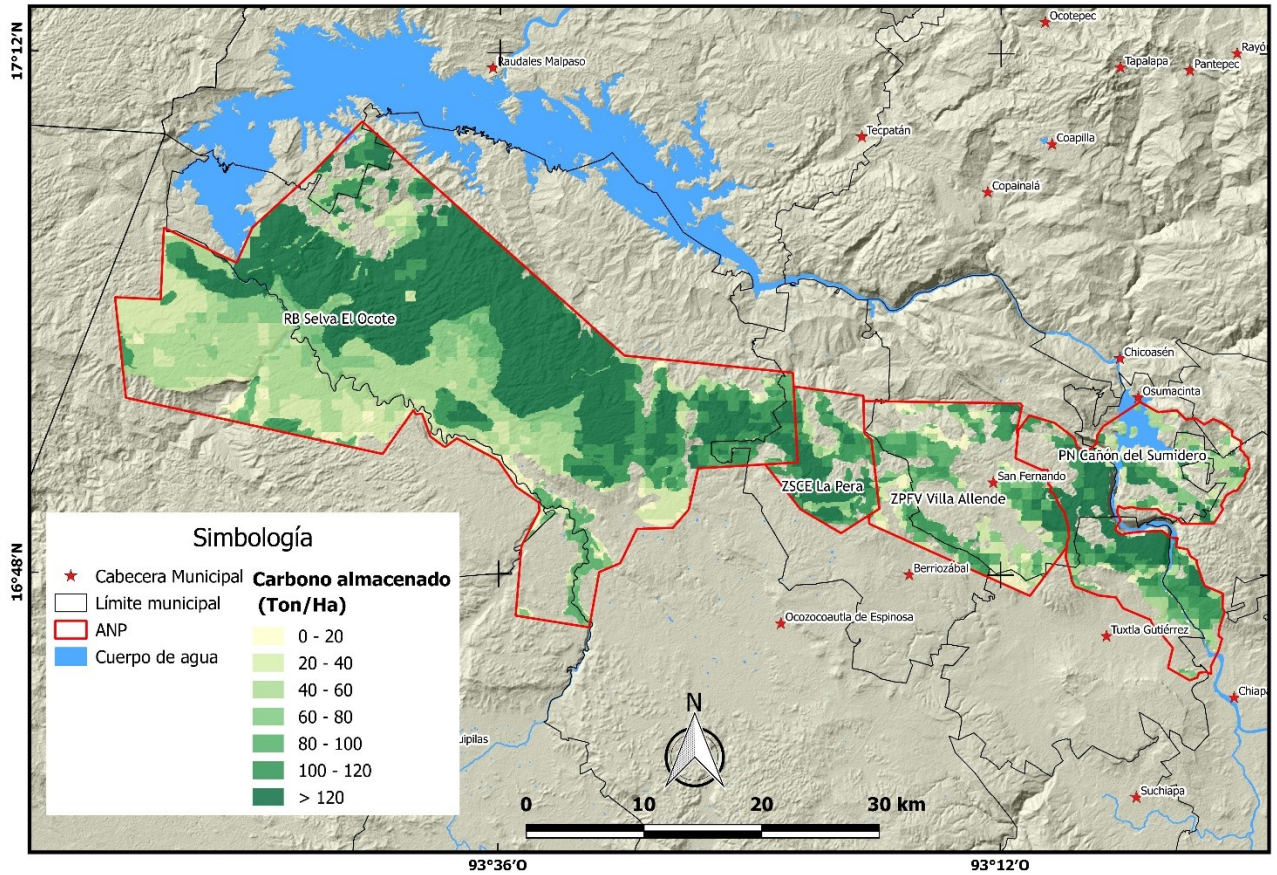
Región	Total carbono (MgC/Ha)	Promedio carbono (MgC/Ha)	Porcentaje respecto a la región
Total de la región	14,599,143.00		100.00%
Reserva de la Biosfera Selva El Ocote	4,545,580.50	55.15	31.14%
Zona Protectora Forestal Vedada de la población de Villa Allende	169,141.05	16.51	1.16%
Parque Nacional Cañón del Sumidero	390,486.81	50.73	2.67%
Área Natural Protegida de La Pera	252,111.52	49.97	1.73%
Total Corredor Biológico Selva el Ocote – Cañón del Sumidero	5,357,319.88	51.23	36.70%

**Tabla 13.** Estimación de carbono para la región.

Para 2021, la tendencia se muestra a continuación (caso sin restricciones):

Región	Total carbono (MgC/Ha)	Promedio carbono (MgC/Ha)	Porcentaje respecto a la región
Total de la región	36,209,200.00		100.00%
REBISO	7,725,692.00	93.77	21.34%
Zona Protectora Forestal Vedada de la población de Villa Allende	751,647.81	73.37	2.08%
Parque Nacional Cañón del Sumidero	1,117,426.38	95.69	3.09%
Área Natural Protegida de La Pera	539,455.63	106.93	1.49%
Total Corredor Biológico Selva el Ocote – Cañón del Sumidero	10,134,221.82	92.70	27.99%

**Tabla 14.** Estimación de carbono para la región sin restricciones, año 2021.

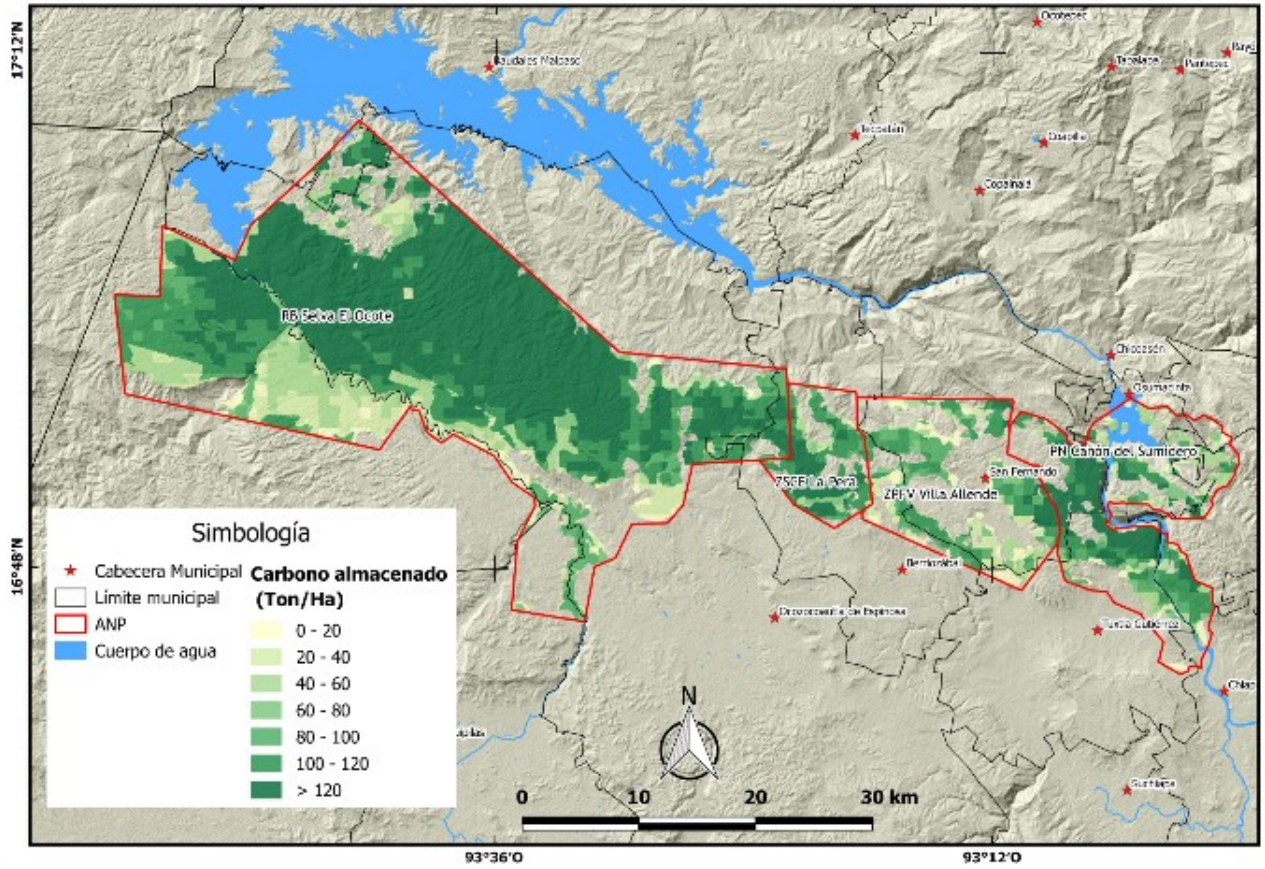


**Figura 12.** Proyección de captura de carbono para el 2021 sin restricción.

Y para el caso de las restricciones, las estimaciones se muestran a continuación:

Región	Total carbono (MgC/Ha)	Promedio carbono (MgC/Ha)	Porcentaje respecto a la región
Total de la región	36,241,740.00		100.00%
REBISO	9,002,880.00	109.24	24.84%
Zona Protectora Forestal Vedada de la población de Villa Allende	730,594.75	71.31	2.02%
Parque Nacional Cañón del Sumidero	1,097,579.75	91.42	3.03%
Área Natural Protegida de La Pera	540,280.25	107.09	1.49%
Total Corredor Biológico Selva el Ocote – Cañón del Sumidero	11,371,334.75	104.00	31.38%

**Tabla 15.** Estimación de carbono para la región con restricciones, año 2021.



**Figura 13.** Proyección de captura de carbono para el 2021 con restricción.



## 9.4 Estimación económica

De acuerdo a las metodologías utilizadas para la estimación económica del carbono almacenado por tonelada en el Corredor Ecológico, se observa que existe una mayor valoración económica internacional por unidad capturada que lo contemplado por las autoridades mexicanas. En este sentido, el PSA-CABSA trabaja con un precio constante por un periodo de 5 años, partiendo de un precio máximo de \$100 pesos MXN por tonelada de CO<sub>2</sub>, que para el año 2017 se estima en \$5,37 USD; mientras que de acuerdo al método DICE, para este año el precio por tonelada de CO<sub>2</sub> corresponde a \$33.1 USD.

Dado lo anterior, en la Tabla 16 se muestra la valoración económica del CO<sub>2</sub> almacenado por ANP para el periodo 2021 bajo el programa PSA-CABSA, y en la Tabla 17 bajo la metodología DICE. Del mismo modo, en la primera tabla se muestra el estimado para los de acuerdo a la variación del dólar como divisa internacional, la cual se cotiza respectivamente a \$18.62 pesos MXN como promedio para noviembre de 2017 (Banamex, 2017).

ANP	CO <sub>2</sub> capturado en área sin restricción	CO <sub>2</sub> capturado en área con restricción	Beneficio monetario estimado sin restricción (precio base)	Beneficio monetario estimado con restricción (precio base)	Beneficio monetario estimado sin restricción (precio top)	Beneficio monetario estimado con restricción (precio top)
REBISO	7,725,692	9,002,880	20,745,682.06	24,175,295.38	41,491,364.12	48,350,590.76
PNCS	1,117,426.38	1,097,579.75	3,000,607.89	2,947,314.04	6,001,215.79	5,894,628.09
La Pera	539,455.63	540,280.25	1,448,591.92	1,450,806.26	2,897,183.83	2,901,612.51
Villa Allende	751,647.81	730,594.75	2,018,388.32	1,961,854.86	4,036,776.64	3,923,709.72
Total 2021	10,134,221.82	11,371,334.75	27,213,270.19	30,535,270.54	54,426,540.39	61,070,541.08

**Tabla 16.** Estimación monetaria de CO<sub>2</sub> para el año 2021 bajo metodología PSA-CABSA.

Igualmente, de acuerdo a lo anterior, en la tabla 17, se muestra la estimación monetaria por captura de carbono para el año 2021 bajo la metodología DICE.

ANP	CO <sub>2</sub> capturado en área sin restricción	CO <sub>2</sub> capturado en área con restricción	Beneficio monetario estimado sin restricción	Beneficio monetario estimado con restricción
REBISO	7,725,692	9,002,880	296,813,360.9	345,881,646.7
PNCS	1,117,426.38	1,097,579.75	42,930,403.9	42,167,916.42
La Pera	539,455.63	540,280.25	20,725,345.66	20,757,026.92
Villa Allende	751,647.81	730,594.75	28,877,557.31	28,068,719.7
Total 2021	10,134,221.82	11,371,334.75	389,346,667.77	436,875,309.79

**Tabla 17.** Estimación monetaria de CO<sub>2</sub> para el año 2021 bajo metodología DICE.

Igualmente, es posible evidenciar que existe una diferencia significativa entre la estimación económica asociada al Corredor Biológico cuando es tomado como área sujeta a restricción o no, dado su carácter de ANP, puesto que, la variación del CO<sub>2</sub> capturado es superior a un millón de toneladas de una con respecto a otra.

## **10. CONCLUSIÓN**

La integración de la modelación de elementos biofísicos, la prospección y valoración económica, es de importancia dentro de la valoración de los servicios ecosistémicos. Analizar la dinámica y provisión de los servicios ecosistémicos, permite identificar y entender, parte de las complejidades a las cuales estos procesos están sometidos, tal es el caso de la captura del carbono.

El presente estudio permitió identificar las áreas de mayor almacenaje de carbono, así como las áreas potenciales y con mejores tasas de acumulación a futuro. A su vez, también permitió conocer las áreas de pérdida de dicha capacidad de almacenaje y el porqué de su pérdida. Otro punto relevante que se cumplió en base a los objetivos planteados en un inicio, fue el conocer el valor monetario estimado del carbono almacenado en el área de estudio, donde considerando el corredor biológico Selva El Ocote – Cañón del Sumidero, se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

De acuerdo con los resultados obtenidos para la estimación de carbono almacenado en el corredor biológico, se tiene que para el año proyectado 2021, existirá un incremento del 47.13% (considerando un escenario sin restricción) con respecto a lo almacenado actualmente, mientras que considerando un escenario con restricción, esta cifra aumentaría hasta 52%.

De acuerdo a los modelos ejecutados, se identificó que los usos de suelos correspondientes a las clases agrícolas-agropecuarias, son el principal agente de cambio de cobertura del suelo, dentro y al exterior del corredor biológico, lo cual es alarmante dado que comienzan a generar presión a los servicios ecosistémicos ofertados por las ANP's en general, y pone en riesgo la conservación de los macizos forestales aún existentes.

La figura de las ANP's como condicionantes restrictivas dentro de la dinámica del cambio de uso de suelo, a nivel del corredor biológico, funge como agente de contención y protección de los diferentes servicios ecosistémicos ante la amenaza/presión de los sistemas agrícolas-agropecuarias.

La modelación prospectiva permite explorar diferentes escenarios, integrando diversas variables explicativas y en condiciones de simulación conocer cómo puede comportarse la dinámica de cambio de usos de suelo.

El incorporar en el estudio un valor monetario para los servicios ecosistémicos, como lo es el carbono, da a conocer las pérdidas o ganancias que se puede tener en consecuencia de los cambios de usos de suelo, lo cual puede representar un punto de inicio para la propuesta de políticas públicas que coadyuven a la conservación de zonas forestales o darle mayor importancia a las ANP's.

### **10.2 RECOMENDACIONES**

Utilizar datos LIDAR para aumentar la resolución espacial del modelo continuo de alturas del dosel, con el objeto de lograr obtener datos mucho más precisos en la estimación del carbono de acuerdo al tipo de vegetación.

Realizar una clasificación supervisada con imágenes satelitales de mayor resolución espacial, para asegurar de este modo obtener una mayor precisión en el modelo de cambio de uso del suelo.

Incorporar variables socioeconómicas como elementos explicativos para la modelación de cambios de uso del suelo, en orden de estimar los efectos de la población sobre las áreas naturales.

Igualmente, en el uso de ecuaciones alométricas, para la estimación del carbono almacenado, se recomienda el uso no sólo del género de la vegetación, sino también el de especies, con el fin de estimar con mayor exactitud la capacidad de almacenamiento de las plantas.

## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aalde, H., Gonzalez, P., Gytarsky, M., Krug, T., Kurz, W., Ogle, S., Raison, J., Schoene, D., Ravindranath, N.H., Elhassan, N., Heath, L., Higuchi, N., Kainja, S., Matsumoto, M., Sanz-Sánchez, M.J. y Somogyi, Z. 2006. *Capítulo 4: Tierras forestales*. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra.

Bajat, B., Pejovic, M., Lukovic, J., Manojlovic, P., Ducic, V. y Mustafic, S. 2013. *Mapping average anual precipitation in Serbia (1961-1990) by using regression kriging*. Theoretical and Applied Climatology, Vol. 112, Issue 1-2. pp 1-13.

Balvanera, P & Cotler, H. 2007. *Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos*. Instituto Nacional de Ecología (INE), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Gaceta Ecológica Número 84-85. México. 125pp.

Balvanera, P., H. Cotler. 2011. *Los servicios ecosistémicos*. CONABIO. Biodiversitas 94:7-11.

Bird, D., Schwaiger, H. y Canella, L. 2007. *Manual del usuario para el DSS dice/u00f1o de proyectos y carbono*. Proyecto Encofor. Quito, Ecuador. 30 pág.

Bolaños-González, Y., Bolaños-González, M., Paz-Pellat, F. y Ponce-Pulido, J.I. 2017. *Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México*. Terra Latinoamericana, Vol. 35 No. 1, Chapingo.

Bustamante, M y Ochoa, E. 2014. *Guía práctica para la valoración de servicios ecosistémicos en Madre de Dios*. WWF Perú. Servicio Holandes de Cooperación al Desarrollo (SNV).

Carmona, J. 2017. *Estimación del contenido y captura potencial de carbón en biomasa aérea, en la reserva de la biosfera del Abra Tanchipa, San Luis Potosí, México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Licenciatura en Biología. México. 129 pp.

Chou, S. y Gutiérrez-Espeleta, E.E. (2012). *Ecuación para estimar la biomasa arbórea en los bosques tropicales de Costa Rica*. Tecnología en Marcha vol. 26, No. 2. pp 41-54.

CONANP-GIZ. 2017. *Valoración de los Servicios Ecosistémicos del Parque Nacional Cabo Pulmo*. Ciudad de México. Proyecto de Valoración de Servicios Ecosistémicos de Áreas Naturales Protegidas Federales de México: una herramienta innovadora para el financiamiento de biodiversidad y cambio climático (EcoValor MX).

DOF (Diario Oficial de la Federación). 1980. Decreto por el que se declara Parque Nacional, con el nombre de Cañón del Sumidero el área descrita en el Considerando Quinto, y se expropia en favor del Gobierno Federal una superficie de 217.894,190.00 M2., ubicada en el Estado de Chiapas. México.

DOF. 2000. Decreto por el que se pretende declarar como área natural protegida con el carácter de reserva de la biosfera la región denominada Selva el Ocote, México.

Domínguez-Cabrera, G., Aguirre-Calderón, O.A., Rodríguez-Laguna, R., y Díaz-Balderas, J.A. 2009. *Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del*

sur de Nuevo León. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 15 (1): 59-64.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2004. *Actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales a 2005*. Programa de Evaluación de los Recursos Forestales, Roma.

Ferrere, P., Lupi, A.M. y Boca, R.T. (2014). *Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de Eucalyptus viminalis Labill.* Quebracho, Vol. 22 (1,2). p 100-113.

Galicia, L., Saynes, V., y Campo, J. 2015. *Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal.* Botánica Sciences 93 (3): 473-484.

He, Q., Chen, E., An, R. y Li, Y. 2013. *Above-Ground Biomass Components Estimation Using LiDAR Data in a Coniferous Forest.* Forests 4:984-1002.

Hengl, T., Heuvelink, G.B.M. y Stein, A. 2004. *A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging.* Geoderma Vol. 120, Issue 1-2. pp 75-93.

INEGI (Instituto Nacional de Geografía y Estadística). 2015. *Encuesta intercensal 2015*. INEGI, México.

INEGI. 2012. *Conjunto de datos vectorial de uso de suelo y vegetación, serie V*. INEGI, México.

INEGI. 2006. *Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1:250000*. INEGI, México.

INEGI. 1980. *Carta de climas, escala 1:1000000*. INEGI, México.

Jill, J. 2015. *Valoración económica de la naturaleza y pago por servicios ambientales: ¿reconocer el valor de la naturaleza o asignarle un precio a la destrucción?* Fundación Heinrich Böll. Heinrich Böll Stiftung: México, Centroamérica y El Caribe.

Jong, B., Olguín, M., Rojas, F., Maldonado, V., Paz, F., Etchevers, J., Cruz, C.O., Argumedo, J.A., Martínez, P., de la Cruz, V., Jiménez, F., Masera, O., Martínez, R., Guerrero, G., Patiño, P., Morfín, J., Alvarado, E., Pérez, D., Guilardi, A., Ordóñez, A. y Hernández, T. 2006. *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero 1990 a 2006*. Instituto Nacional de Ecología. 122 pp.

Karl, J.W. 2009. *Spatial predictions of cover attributes of rangeland ecosystems using regression kriging and remote sensing.* Rangeland Ecology & Management, Vol. 63, Issue 3. Pp. 335-349.

Meng, Q. 2014. *Regression kriging versus geographically weighted regression for spatial interpolation.* International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS, Vol. 3, Issue 1. pp. 606-615.

Millennium Ecosystem Assessment (MEA). 2005. *Ecosystem and human well-being: a framework for assessment*. Island Press, Washington, DC.

Narayan, V., Kumar, P, y Mohan, K. 2014. *Prediction of Land Use Changes Based On Land Changes Modeler (LCM) Using Remote Sensing: A Case Study of Muzaffarpur (Bihar), India*. Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijić" 64(1): 111-127.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2017. *Valuing Climate Damages: Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide*. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/24651.

Nordhaus, W.D. 2017. *Revisiting the social cost of carbon*. PNAS 114(7): 1518–1523.

Periódico Oficial. 2006. Decreto número 427: Decreto por el que se declara el establecimiento del área natural protegida con carácter de zona sujeta a conservación ecológica, el área conocida como “La Pera” ubicada en el municipio de Berriozabal, Chiapas. Secretaria de Gobierno de Chiapas, Tomo II, Tuxla Gutiérrez.

ProFores. 2015. *Vínculos FLEGT-REDD+: ¿Qué es REDD+?* ProForest y ONU-REDD.

Lapeyre, T., Alegre, J. y Arévalo, L. 2004. *Determinación de las reservas de carbono de la biomasa aérea, en diferentes sistemas de uso de la tierra en San Martín, Perú*. Ecología Aplicada, Vol. 3, N. 1-2, Lima.

Rincón-Ruíz, A., Echeverry-Duque, M., Piñeros, A.M., Tapia, C.H., David, A., Arias-Arévalo, P. y Zuluaga, P.A. 2014. *Valoración integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos: Aspectos conceptuales y metodológicos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia, 151 pp.

Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal Siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura del carbono en Ecosistemas Forestales, realizado en Valdivia, Chile, del 18 al 20 de octubre de 2001.

SEMARNAP (Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 2000. *Áreas Naturales Protegidas de México con Decretos Federales*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, México.

SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2001. *Programa de manejo Reserva de la Biosfera Selva El Ocote*. Comisión Nacional de Área Naturales Protegidas, México.

Simard, M., Pinto, N., Fisher, J. B., Baccini, A., 2011. *Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar*. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 116(G4).

Šmelko, Š., Merganič, J., 2008. *Some methodological aspects of the National Forest Inventory and Monitoring in Slovakia*. J. For. Sci, 54(10), 476-483.

SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto). 1980. *Frontera agrícola*. SPP, México.

Vásquez, A. y Arellano, H. (2012). *Estructura, biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba*. Colombia Diversidad Biótica XII, La región Caribe de Colombia (Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá). pp 923-961.

World Wide Fund For Nature (WWF). 2014. *Estimación del carbono en la biomasa aérea de los bosques de la región Madre de Dios*. WWF, 11 pp.

Yongkai, A., Wenxi, L. y Weiguo, C. 2015. *Surrogate model application to the identification of optimal groundwater exploitation scheme based on regression kriging method – a case study of Western Jilin Province*. Int. J. Environ. Res. Public Health, 12(8). pp. 8897-8918.

## **11.2 Recursos electrónicos**

BioEnciclopedia. 2016. *Ciclo del carbono*. Recuperado de <http://www.bioenciclopedia.com/ciclo-del-carbono/>

De los Santos, Sandra. 2014. *Villa Allende: el oasis de la naturaleza de Tuxla, San Fernando y Berriozabal*. Recuperado de <https://revoluciontrespuntocero.mx/111317/>

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. 2011. Valoración económica de los Servicios ecosistémicos. Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo. Recuperado de: [http://www.biomarcc.org/download\\_PDF/FS\\_ValoracionSE\\_sp.pdf](http://www.biomarcc.org/download_PDF/FS_ValoracionSE_sp.pdf)

Greenpeace. 2017. La deforestación y sus causas. Recuperado de <http://www.greenpeace.org/mexico/es/Campanas/Bosques/La-deforestacion-y-sus-causas/>

ORNL DAAC. 2017. Spatial Data Access Tool (SDAT). ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, EE.UU. Consultado el 10 de noviembre de 2017. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1388>

Pérez, G. 2017. *Ciclo del carbono*. Recuperado de <https://www.ciclodelcarbono.com/>