

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



Utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la
Valoración Económica del Servicio Ecosistémico de Fijación de
Carbono en la Reserva Privada "Refugio del Quetzal", Suchitepéquez,
Guatemala.

Trabajo de graduación presentado por

Luz María Osorio Salguero

para optar al grado académico de Licenciada en Biología

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ciencias y Humanidades



Utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la
Valoración Económica del Servicio Ecosistémico de Fijación de
Carbono en la Reserva Privada "Refugio del Quetzal", Suchitepéquez,
Guatemala.

Trabajo de graduación presentado por


Luz María Osorio Salguero

para optar al grado académico de Licenciada en Biología

Guatemala,


2024

Vo.Bo.


(f) 

Dr. Miguel Martínez Tuna

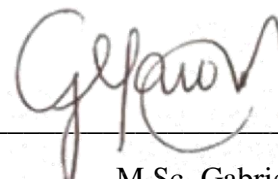
Tribunal Examinador:

(f) 

Dr. Miguel Martínez Tuna

(f) 

M.Sc. Diego Incer

(f) 

M.Sc. Gabriela Alfaro

Fecha de aprobación examen de graduación: Guatemala, 22 de enero 2024

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de diversas maneras a la realización de este trabajo de tesis. Sus apoyos, consejos y aliento fueron fundamentales para culminar este proyecto con éxito.

A Dios, por el don del conocimiento y la oportunidad de aprender y crecer a través de esta experiencia. También por la fuerza que me ha dado para perseverar, por la claridad de mente para comprender y analizar, y por el corazón agradecido que me ha llevado a esta etapa de mi vida.

A mis padres, Luz del Carmen y Sergio, por su amor, comprensión y sacrificio. Esta tesis es un testimonio de los valores y la ética de trabajo que ustedes me han inculcado a lo largo de los años. Gracias por brindarme la oportunidad de perseguir mis sueños y metas académicas.

A mis dos hermanas, Andrea y Claudia, ustedes han sido faros de inspiración y modelos a seguir. Han demostrado una dedicación excepcional en sus respectivas carreras y en todas sus metas, lo que me ha motivado a alcanzar lo mejor de mí en mi propio camino académico.

A mis dos asesores de tesis, Dr. Miguel Martínez Tuna y Diego Incer, por su orientación experta, su paciencia y su dedicación. Sus valiosas sugerencias y su mentoría constante me han guiado a lo largo de este camino y han enriquecido mi comprensión del tema.

A mis amigos y compañeros de estudio, quienes me brindaron apoyo emocional y motivación durante este proceso. Sus palabras de aliento y sus discusiones fueron inspiradoras.

Al Departamento de Biología, Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad (CEAB) e Impulsouth – Fundación Avina por proporcionar los recursos necesarios y el ambiente propicio para llevar a cabo esta investigación.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo a la memoria de Rudy Osorio†, quien siempre creyó en mí y cuyo amor por la naturaleza me inspiró a perseguir mis metas académicas dentro del área de Biología.

Gracias a todos los mencionados y a aquellos que de alguna manera contribuyeron a este logro. Este trabajo no hubiera sido posible sin su apoyo y aliento.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
LISTADO DE FIGURAS	v
LISTADO DE CUADROS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	4
III. OBJETIVOS	5
3.1 Objetivo general	5
3.2 Objetivos específicos.....	5
IV. HIPÓTESIS.....	6
V. VARIABLES	7
VI. MARCO TEÓRICO.....	8
6.1 Cambio climático	8
6.1.2 Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados CMIP	11
6.2 Cambio climático en Guatemala	12
6.3 Impacto de cambio climático en Guatemala	13
6.4 Servicios Ecosistémicos	14
6.4.1 Servicios de soporte.....	15
6.4.2 Servicios de aprovisionamiento.....	15
6.4.3 Servicios culturales.....	16
6.4.4 Servicios de regulación.....	16
6.5 Servicio de regulación: captura de carbono.....	17
6.6 Mercado de Carbono	17
6.6.1 Iniciativas del Mercado de Carbono en Guatemala.....	18
6.7 Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”	20
6.8 Bosque Nuboso	21
6.8.2 Diversidad biológica del Bosque Nuboso.....	22
6.8.2 Servicios ecosistémicos del bosque nuboso.....	23
6.8.3 Métodos para determinación de servicios ecosistémicos	24

6.9 Metodología Sistemas de Información Geográfica.....	25
6.9.1 Modelamiento espacial utilizando variables ambientales.....	25
6.9.2 Mapas de cobertura forestal y uso de suelo.....	26
6.9.3 Mapas de reservas de carbono vegetal.....	27
6.9.4 Valorización económica de variables SIG relacionadas con los servicios ecosistémicos	29
VII. METODOLOGÍA.....	30
7.1 Sitio de estudio.....	30
7.2 Fuente de datos.....	30
7.3 Elaboración de mapas de cambio de cobertura forestal futuro utilizando el software TerrSet.....	30
7.4 Elaboración de mapas de zonas de vida futuros Reserva Refugio del Quetzal...	31
7.5 Análisis económico de stock de carbono Reserva Refugio del Quetzal	31
VIII. RESULTADOS.....	34
8.1 Análisis del almacenamiento de carbono Reserva Refugio del Quetzal.....	34
8.2 Análisis económico del almacenamiento de carbono Reserva Refugio del Quetzal	35
8.3 Cambios de almacenamiento de carbono Reserva Refugio del Quetzal.....	37
8.4 Mapas de zonas de vida para la reserva años 2016, 2050 y 2080.....	38
8.5 Mapas de cambio de cobertura forestal futuro TerrSet años 2050 y 2080.....	41
IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	45
9.1 Cuantificación del almacenamiento de carbono mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	45
9.2 Valorización económica de almacenamiento de carbono mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	47
9.3 Impacto del Valor Económico del Carbono en la Conservación y Manejo de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”.....	48
X. CONCLUSIONES	49
XI. RECOMENDACIONES.....	50
XII. LITERATURA CITADA	51

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. (a) Proyección de CO_2 equivalente en los cuatro caminos de forzamiento radiativo RCP2.6, RCP 4.5, RCP6, RCP8.5 hasta el año 2500. (b) Proyección del cambio de la temperatura en superficie media global simulada para las cuatro trayectorias de concentración representativas (RCP) hasta 2300 (respecto a 1986-2005), seguido por un forzamiento radiativo constante (nivel en el año 2300).....	10
Figura 2. Cinco Escenarios generados del 2 Proyecto de Intercomparacion de Modelos Acoplados (CMIP6) del Cambio de la temperatura de la superficie terrestre.	11
Figura 3. Vínculos entre los Servicios Ecosistémicos y el Bienestar Humano.	15
Figura 4. Servicios ecosistémicos.....	16
Figura 5. Volcán Atitlán municipio Santa Bárbara, Suchitepéquez. Fotografía por: José Monzón, 2022.....	21
Figura 6. Distribución nacional ecosistema bosque nuboso.	22
Figura 7. Mapa de cobertura forestal de la República de Guatemala del año 2016.	27
Figura 8. Estratificación de Carbono (tC/ha) en la cobertura forestal del año 2010.	28
Figura 9. Mapa de polígono de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal, Suchitepéquez, Guatemala.	33
Figura 10. Factores que influyen en las fluctuaciones de captura de carbono de la Reserva Privada “Refugio del Quetzal”.....	37
Figura 11. Mapa de zonas de vida año 2016 para la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.....	38
Figura 12. Mapa de zonas de vida año 2050 para la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.....	39
Figura 13. Mapa de zonas de vida año 2080 para la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.....	40
Figura 14. Mapa de Cobertura Forestal año 2050 probabilidad de pérdida de bosque 20% TerrSet 2020 para Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.	41
Figura 15. Mapa de Cobertura Forestal año 2050 probabilidad de pérdida de bosque 10% TerrSet 2020 para Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.	42
Figura 16. Mapa de Cobertura Forestal año 2080 probabilidad de pérdida de bosque 20% TerrSet 2020 para Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.	43
Figura 17. Mapa de Cobertura Forestal año 2080 probabilidad de pérdida de bosque 10% TerrSet 2020 para Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.	44

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1. Los cuatro escenarios de forzamiento radiativo. FR (W/m ²) = forzamiento radiativo en watts por metro cuadrado de la superficie del planeta. CO ₂ en 2100 (ppm) = cantidad de dióxido de carbono en partes por millón proyectadas para el año 2100	9
Cuadro 2. Toneladas de carbono por hectárea (tC/ha.) clasificado por estrato y por zona de vida identificada de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal” año 2016.	34
Cuadro 3. Cantidad de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (<i>CO₂e</i>) por estrato de carbono y zona de vida identificada de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”.	35
Cuadro 4. Valor monetario en Quetzales (Q) del dióxido de carbono equivalente almacenado (<i>CO₂e</i>) por zona de vida identificada de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”	36
Cuadro 5. Valor monetario en dólares estadounidenses (\$) del dióxido de carbono equivalente almacenado (<i>CO₂e</i>) por zona de vida identificada de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”.	36

RESUMEN

El siguiente documento aborda la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el propósito de realizar una valoración económica del servicio ecosistémico de fijación de carbono en la Reserva Privada "Refugio del Quetzal" en Suchitepéquez, Guatemala. Este servicio es de gran importancia debido a su capacidad para mitigar los efectos del cambio climático al capturar y almacenar carbono atmosférico.

Se implementó una metodología que implica la recopilación de datos geoespaciales y el uso de programas SIG, como QGIS versión 3.32.2. Estos se emplearon en conjunto con el software de Monitoreo y Modelado Geoespacial TerrSet 2020, para crear mapas que cuantifican y representan la cantidad de carbono almacenado en la biomasa forestal en la reserva, durante los años 2016, 2050 y 2080.

Una vez que se recopilaron los datos sobre la cantidad de carbono almacenado en la reserva, se procedió a convertirlos en unidades monetarias en Quetzales utilizando Microsoft Excel 2016, teniendo en cuenta los precios vigentes en el mercado de carbono de \$5 USD por tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), según el documento titulado "Metodología para la estimación del precio social del carbono en Chile y los países de América Latina y el Caribe", elaborado por Mena en 2021.

Para llevar a cabo esta conversión, se transformaron las toneladas de carbono por hectárea en toneladas equivalentes de dióxido de carbono, que se utilizan en el cálculo de los pagos de bonos verdes por la captura de carbono. De esta manera, se obtuvieron datos en unidades monetarias que representan el almacenamiento de carbono para los años 2016, 2050 y 2080. Se determinó que el valor monetario de la Reserva Natural Privada "Refugio del Quetzal" en términos equivalentes de dióxido de carbono (CO_2e) para el 2016 es de Q 15,267,687.97. Asimismo, representa Q 146,040.37 en equivalencia de dióxido de carbono (CO_2e) para los años 2050 y 2080.

Es posible que se produzca un cambio en el almacenamiento de carbono debido a la transformación del tipo de bosque. Los modelos indican un aumento del 4,872% en el almacenamiento de carbono en la zona de vida "Bosque Muy Húmedo Montano Tropical" (bh-PMT) dentro de la Reserva, proyectado para los años 2050 y 2080. Para el año 2080, la Reserva Privada contará con 11.34 toneladas de carbono por hectárea almacenadas en el "Bosque Tropical Húmedo" (bh-T), que es un nuevo tipo de zona de vida no reportado en años anteriores en el volcán Atitlán. Además, se prevé que, para este año, el "Bosque Muy Húmedo Pre montano Tropical" (bmh-PMT) transicionará a "Bosque Muy Húmedo Montano Tropical" (bh-PMT).

A pesar de la observada pérdida de cobertura forestal para los años 2050 y 2080 en la Reserva "Refugio del Quetzal", esta no es significativa según los modelos, ya que la reserva se encuentra bajo un manejo sostenible, en conjunto con su ubicación geográfica y lejanía a caminos.

Se recomienda seguir monitoreando y actualizando los datos de almacenamiento de carbono de la Reserva, con la finalidad de validar las predicciones a lo largo del tiempo y ajustar las estrategias de manejo en consecuencia. Además, se recomienda reforzar la importancia de las

prácticas de manejo sostenible y promover la adopción de enfoques de conservación que equilibren la conservación del carbono con otras necesidades y actividades humanas en la zona.

ABSTRACT

The following document addresses the application of Geographic Information Systems (GIS) for the purpose of conducting an economic valuation of the carbon sequestration ecosystem service in the "Refugio del Quetzal" Private Reserve in Suchitepéquez, Guatemala. This service is of great importance due to its capacity to mitigate the effects of climate change by capturing and storing atmospheric carbon.

A methodology was implemented that involves the collection of geospatial data and the use of GIS software, such as QGIS version 3.32.2. These were used in conjunction with the Geospatial Monitoring and Modeling software TerrSet 2020 to create maps that quantify and represent the amount of carbon stored in the forest biomass within the reserve for the years 2016, 2050, and 2080.

Once the data on the amount of carbon stored in the reserve was collected, it was converted into monetary units in Quetzales using Microsoft Excel 2016, taking into account the prevailing carbon market prices of \$5 USD per ton of carbon dioxide equivalent (CO_2e), as detailed in the document titled "Methodology for the Estimation of the Social Cost of Carbon in Chile and Latin American and Caribbean Countries," prepared by Mena in 2021.

To perform this conversion, carbon tons per hectare were transformed into equivalent tons of carbon dioxide, which are used in the calculation of green bonds payments for carbon capture. In this way, data in monetary units representing carbon storage for the years 2016, 2050, and 2080 were obtained.

It was determined that the monetary value of the "Refugio del Quetzal" Private Natural Reserve in terms of carbon dioxide equivalent (CO_2e) for 2016 is Q 15,267,687.97.. Likewise, it represents Q 199,904 tC in terms of carbon dioxide equivalent (CO_2e) for the years 2050 and 2080.

A change in carbon storage may occur due to the transformation of the forest type. Models indicate a 4,872% increase in carbon storage in the "Bosque Muy Húmedo Montano Tropical" (bh-PMT) life zone within the Reserve, projected for the years 2050 and 2080. By the year 2080, the Private Reserve will have 11.34 tons of carbon per hectare stored in the "Bosque Tropical Húmedo" (bh-T), which is a new type of life zone not reported in previous years around the Atitlán volcano. Furthermore, it is expected that by this year, the "Bosque Muy Húmedo Pre montano Tropical" (bmh-PMT) will transition to "Bosque Muy Húmedo Montano Tropical" (bh-PMT).

Despite the observed forest cover loss for the years 2050 and 2080 in the "Refugio del Quetzal" Reserve, this is not significant according to the models, as the reserve is under sustainable management, combined with its geographical location and distance from roads.

It is recommended to continue monitoring and updating the carbon storage data of the Reserve to validate predictions over time and adjust management strategies accordingly. Reinforcing the importance of sustainable management practices in the Reserve and promoting the adoption of conservation approaches that balance carbon conservation with other human needs and activities in the area is also recommended.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, ha surgido un enfoque interdisciplinario que busca evaluar y cuantificar los beneficios proporcionados por los ecosistemas, conocidos como servicios ecosistémicos, en términos económicos. Este enfoque reconoce que los ecosistemas proveen una serie de bienes y servicios fundamentales para la sociedad, como la captura de carbono, la regulación del clima, la provisión de agua limpia, la conservación de la biodiversidad y el soporte a actividades recreativas y turísticas. La valoración económica de estos servicios se ha convertido en una herramienta crucial para comunicar su importancia a los responsables de la toma de decisiones y promover prácticas de manejo sostenible.

En particular, la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha experimentado un notable avance en la capacidad de mapear, analizar y visualizar datos geoespaciales de manera precisa y efectiva. Los SIG permiten la integración de datos sobre uso del suelo, cobertura vegetal, topografía y otros factores relevantes para la evaluación de servicios ecosistémicos, como el secuestro de carbono. Esta tecnología proporciona una plataforma para identificar áreas críticas para la conservación, estimar la cantidad de carbono almacenado en diferentes zonas y evaluar los cambios en el tiempo.

En este contexto, varios estudios previos han demostrado la efectividad de la combinación de SIG y valoración económica para analizar los servicios de secuestro de carbono. Capitani, *et al.*, (2019) desarrolló con programas de SIG escenarios participativos en Tanzania para evaluar los posibles impactos interrelacionados en los stocks de carbono, la biodiversidad y el rendimiento hídrico de escenarios alternativos. En los cuales REDD+ (reducción de emisiones por la deforestación y degradación forestal, más la conservación de los stocks de carbono forestal, la gestión sostenible de los bosques y el aumento de los stocks de carbono en los países en desarrollo) implementa de manera efectiva o no para 2025, en la economía verde (GE, por sus siglas en inglés) y en el escenario de negocio habitual (BAU, por sus siglas en inglés).

Para eso utilizó información sobre los cambios en el uso de la tierra y la cobertura terrestre (LULCC, por sus siglas en inglés) y las tendencias de emisiones de carbono desde el pasado hasta el presente y el futuro. Dentro de este estudio se determinó que en el escenario BAU, los cambios en el uso de la tierra y la cobertura terrestre provocan una pérdida de stocks nacionales de 296 MtC para Tanzania en 2025, reducen la extensión de hábitats adecuados para especies endémicas y raras, principalmente en bosques montañosos protegidos invadidos, y generan cambios en el rendimiento hídrico.

Asimismo, Wang, *et al.*, (2021) determinó el valor de los servicios ecosistémicos de 1984 a 2017 de la Ciudad de Zhoushan, China mediante SIG usando información sobre cambios en el uso, cobertura del suelo y el método del factor equivalente. Los resultados mostraron que, durante esos años, los patrones de uso del suelo cambiaron significativamente en la Ciudad de Zhoushan. Además, el valor total de los servicios ecosistémicos en el área de estudio aumentó de Q 2,022 millones (USD 254,709,800) en 1984 a Q 2,156 millones (USD 274,679.00) 2017 (+13.46%), con un aumento promedio anual de Q 8.2 o 0.40% anualmente. Este estudio establece un nuevo método

de evaluación ambiental regional, lo cual es de gran importancia para la formulación de la planificación del desarrollo sostenible.

A pesar de las extensas aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la valorización económica del carbono como servicio ecosistémico, la mayoría de los estudios tienden a centrarse en ecosistemas y ciudades del hemisferio Norte, lo que conlleva a una recopilación de información generalizada sobre estos lugares. No obstante, la poca implementación de metodologías y estudios comparables en el hemisferio Sur, suele dirigirse hacia áreas de estudio específicas debido a la restricción en la disponibilidad de recursos.

Un ejemplo de esto es el estudio realizado por Medina *et al.* (2020), que llevó a cabo una valoración económica del secuestro y almacenamiento de carbono en la puna seca del suroeste de Arequipa, Perú, específicamente en la Reserva Nacional Salinas y Aguada Blanca. El estudio documentó que la Reserva contiene al menos 13,507,104.16 toneladas métricas de CO₂ equivalente, valoradas en Q 678,091,840.00 (USD 86,310,395.58). La investigación utilizó el precio promedio de la tonelada de CO₂equivalente, establecido en el mercado peruano, para obtener el valor económico del servicio ambiental.

Naciones con importantes extensiones de bosque como Guatemala, se enfrentan a desafíos comunes en la lucha contra el cambio climático, los cuales se ven exacerbados por un sistema social y económico caracterizado por la corrupción, y en donde uno de los grandes problemas es el cambio de uso del suelo. En respuesta a la creciente urgencia de abordar el cambio climático, Guatemala ha comenzado a explorar y adoptar enfoques innovadores, como los mercados de carbono, para abordar este desafío global.

Uno de los tipos de bosques más amenazados en Guatemala debido al avance agrícola y el cambio climático es el bosque nuboso. Estos ecosistemas únicos y densos almacenan cantidades significativas de carbono en su biomasa y en el suelo, lo que los convierte en valiosos sumideros de carbono. Entre las pocas zonas en Guatemala que aún cuentan con bosque nuboso destaca la Reserva Privada Refugio del Quetzal, ubicada en las laderas sur del volcán Atitlán, en el municipio de Santa Bárbara, Suchitepéquez (Monzón y Dix, 2018).

La Reserva Natural Privada El Refugio del Quetzal es un espacio de conservación gestionado por el Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad (CEAB-UVG). El propósito de esta reserva es proporcionar un entorno natural para la realización de investigaciones, estudios de campo y proyectos de conservación, brindando a estudiantes de biología y disciplinas afines de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) la oportunidad de adquirir experiencia práctica y conocimientos en un ambiente real. Mediante la posesión de esta reserva privada, la UVG también contribuye activamente a la preservación de la biodiversidad y los ecosistemas naturales de Guatemala (Barrera, 2023).

En este contexto, la aplicación de SIG y la valorización de servicios ecosistémicos juegan un papel crucial. Los SIG facilitan la recopilación, el análisis y la visualización de datos geoespaciales, lo que resulta fundamental para lograr una comprensión detallada de la distribución,

estructura y salud de estos ecosistemas. Por otro lado, la valorización de servicios ecosistémicos implica reconocer y cuantificar los beneficios tangibles que los ecosistemas aportan a la sociedad.

Con el propósito de llevar a cabo una investigación pertinente en la valoración de los servicios ecosistémicos de captura de carbono, con el objetivo de resaltar su relevancia tanto a nivel social como económico en el contexto del mercado de carbono, se desarrolló el presente trabajo cuyo objetivo principal fue evaluar el servicio ecosistémico de captura de carbono en la Reserva utilizando SIG y estimar las variaciones en el servicio ecosistémico de captura de carbono en el bosque nuboso, ante diferentes escenarios futuros. Además de comparar las variaciones económicas de los volúmenes de carbono capturado los diversos escenarios de modelos climáticos.

II. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se enmarca en un contexto global caracterizado por el aumento de la temperatura del planeta y la expansión del sistema económico más allá de los límites del capital biológico. A pesar de los esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático, persisten problemas como la pérdida de biodiversidad y el cambio de uso de suelo, los cuales afectan especialmente a países y sectores en vías de desarrollo.

En respuesta a estos desafíos, emergen alternativas provenientes de las ciencias interdisciplinarias, como la economía ecológica y la economía ambiental, que proponen un enfoque basado en la sostenibilidad y la justicia social. Estos enfoques integran los sistemas económicos y sociales dentro del sistema ecológico y valoran los servicios ecosistémicos, siendo la captura de carbono uno de los más relevantes.

La valoración económica de servicios ecosistémicos, como la captura de carbono, adquiere una relevancia crucial en la gestión de áreas naturales protegidas, como la Reserva Privada "Refugio del Quetzal". Esta reserva, gestionada por el Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad (CEAB-UVG), no solo brinda un entorno propicio para la investigación y la formación práctica de estudiantes universitarios, sino que también contribuye activamente a la preservación de la biodiversidad y los ecosistemas naturales de Guatemala.

Es fundamental que los responsables de la universidad comprendan el valor económico de la captura de carbono en esta reserva, ya que ello permitiría generar ingresos para reinvertir en su conservación y manejo sostenible, fortaleciendo su capacidad para llevar a cabo investigaciones relevantes en ecología, taxonomía y análisis biogeográficos aplicados a la conservación.

Además, la cuantificación del almacenamiento de carbono en la reserva contribuiría a evaluar la contribución de estas áreas a la reducción nacional de emisiones y podría servir como base para solicitar financiamiento climático tanto a nivel internacional como nacional, demostrando la importancia económica y biológica de este servicio en territorios en desarrollo como Guatemala.

Por ende, este estudio propone determinar el valor económico de la captura de carbono, específicamente proporcionado por el bosque nuboso de la Reserva Natural Privada "Refugio del Quetzal", utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), buscando justificar su conservación con datos científicos e implementar nuevas metodologías ex situ, que podrían ser base para otras investigaciones. En caso que la Universidad lo considere pertinente, la investigación puede usarse para iniciar una solicitud de financiamiento climático, tanto de fuentes internacionales como nacionales al demostrar la importancia económica y biológica de este servicio en territorios en desarrollo, como Guatemala.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Valorar el servicio ecosistémico de captura de carbono en la Reserva Privada "Refugio del Quetzal" utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG).

3.2 Objetivos específicos

- Estimar los cambios en el servicio ecosistémico de captura de carbono del bosque nuboso en la Reserva Privada "Refugio de Quetzal" ante diferentes escenarios de modelación climática.
- Comparar la variación económica de los volúmenes de carbono capturado en diferentes escenarios de modelos climáticos en la Reserva Privada "Refugio del Quetzal".

IV. HIPÓTESIS

- Hipótesis nula (H₀): La metodología de Sistema de Información Geográfica (SIG) en conjunto con la modelación futura, no permite determinar el valor del servicio ecosistémico de captura de carbono del bosque nuboso de la Reserva Privada "Refugio del Quetzal".
- Hipótesis alternativa (H_a): La metodología de Sistema de Información Geográfica (SIG) en conjunto con la modelación futura, permite determinar el valor del servicio ecosistémico de captura de carbono del bosque nuboso de la Reserva Privada "Refugio del Quetzal".

V. VARIABLES

X_1 = Cantidad de hectáreas de bosque nuboso de la Reserva "Refugio del Quetzal"

X_2 = Cantidad de hectáreas de bosque muy húmedo

Niveles de variación = Año 2016, Futuro 2050, Futuro 2080

Y = Toneladas de carbono capturadas presente y futuro

Z = Cambio de toneladas de carbono capturadas presente y futuro

VI. MARCO TEÓRICO

6.1 Cambio climático

El cambio climático es uno de los mayores retos ecológicos y sociales del siglo XXI. Este se define como el cambio en los patrones climáticos principalmente causados por las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales hacen que el calor emitido por el sol quede atrapado en la atmósfera terrestre. Los gases de efecto invernadero se pueden clasificar según su fuente, antropogénica o natural. Las emisiones antropogénicas están predominantemente relacionadas con actividades industriales, producción de energía y cambio de uso de suelo. Mientras que las fuentes naturales se relacionan a fenómenos como incendios forestales, terremotos, océanos, permafrost, humedales, lodo y volcanes (Fawzy, Osman, & Doran, 2020).

Hasta ahora, las actividades antropogénicas han causado que la temperatura global aumente 1.0°C por encima del nivel preindustrial registrado, siendo probable que aumente 1.5°C más, entre 2030 y 2053, si persisten las tasas de emisión de gases actuales (IPCC, 2018). Según el Centro de Investigaciones sobre la Epidemiología de Desastre (2019), durante el 2018 se registraron un total de 315 casos de desastres naturales relacionados principalmente con el cambio climático. Casos donde un aproximado de 68,5 millones de personas fueron afectadas, teniendo un impacto y pérdidas económicas de \$131,7 mil millones. Además, los alimentos, el agua, la salud, el ecosistema, el hábitat humano y la infraestructura han sido identificados como los sectores más vulnerables ante el cambio climático.

En los últimos años, en búsqueda a una solución al cambio climático, se han propuesto múltiples estrategias que abarcan principalmente dos temáticas: adaptación y mitigación. La adaptación se orienta a limitar los impactos, buscando reducir las vulnerabilidades e incrementar la resiliencia frente al cambio de clima de los sistemas humanos y naturales. Por otro lado, la mitigación se basa en reducir las emisiones netas a la atmósfera de gases de efecto invernadero, que son, en última instancia, el alimento del cambio climático antropogénico (PNACC, 2021).

6.1.1 Escenarios de cambio climático IPCC

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) crea escenarios de emisiones que describen la cantidad prevista de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del ser humano a la atmósfera. En 1990 IPCC creó los primeros escenarios con el nombre de AS90, y en 1992 publicó IS92, la primera familia de escenarios que tenía en cuenta factores sociales y económicos. Luego, en el Tercer Informe de Evaluación se basó en una nueva serie de escenarios de emisiones creados en 1996 y más útiles que los escenarios IS92. Tras éstos vinieron los SRES (Special Report Emissions Scenarios), que simulan las emisiones futuras basándose en diversas tendencias de desarrollo social, económico, político y tecnológico, entre otras (IPCC, 2001).

Durante el reporte de su quinto informe en 2014 el IPCC identificó múltiples escenarios de forzamiento radiativo, un componente crucial para la modelización del clima. El forzamiento radiativo se define como una variación, expresada en términos de irradiación solar como un watio por metro cuadrado (W/m^{-2}), del flujo radiativo en la parte superior de la atmósfera, debida a una variación del causante externo del cambio climático (IPCC, 2013). Con base en estos escenarios identificados se tiene previsto que el forzamiento radiativo más fuerte se producirá en el año 2100. A pesar de su relevancia, no existe ninguna conexión en la actualidad entre estas trayectorias de forzamiento radiativo y los escenarios socioeconómicos o climáticos asociados a un único escenario socioeconómico o de emisiones (Rivera, Bardales y Ochoa, 2019).

Pese a que son muy similares, los escenarios de emisiones pueden ser más bien el resultado de la fusión de varios futuros económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales. Para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC se han establecido cuatro nuevas posibilidades de emisión llamadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), que encapsulan los cuatro nuevos escenarios de emisión que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750. Dichas trayectorias incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2,6) con un forzamiento radiativo total de $2,6 W/m^{-2}$, dos escenarios intermedios (RCP4,5 y RCP6,0) de 4,5 y $6,0 W/m^{-2}$ respectivamente, y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8,5) de $8,5 W/m^{-2}$. Los escenarios de referencia, en los que no se controlan las emisiones, se sitúan entre RCP6.0 y RCP8.5 (IPCC, 2013).

Cabe resaltar que todos los escenarios previstos RCP por el IPCC suponen un aumento de la temperatura media global y del nivel del mar. Según estos escenarios, es altamente probable que la temperatura global en la superficie para finales del siglo XXI sea superior en $1.5^{\circ}C$ con respecto a la del periodo entre 1850 y 1900. Se prevé que la temperatura será superior en $2^{\circ}C$ para los escenarios RCP6.0 y RCP8.5, y posiblemente que sea superior en $2^{\circ}C$ para el escenario RCP4.5. El calentamiento continuará mostrando una variabilidad entre interanual y decenal, no será uniforme entre regiones, y seguirá después de 2100 en todos los escenarios RCP, excepto para la RCP2.6 (IPCC, 2013).

Escenario	FR	Tendencia FR en 2100	CO ₂ en 2100 (ppm)
RCP2,6	2,6	Decreciente	421
RCP4,5	4,5	Estable	538
RCP6,0	6,0	Creciente	670
RCP8,5	8,5	Creciente	936

Cuadro 1. Los cuatro escenarios de forzamiento radiativo. FR (W/m^2) = forzamiento radiativo en watts por metro cuadrado de la superficie del planeta. CO₂ en 2100 (ppm) = cantidad de dióxido de carbono en partes por millón proyectadas para el año 2100.

(IPCC, 2013)

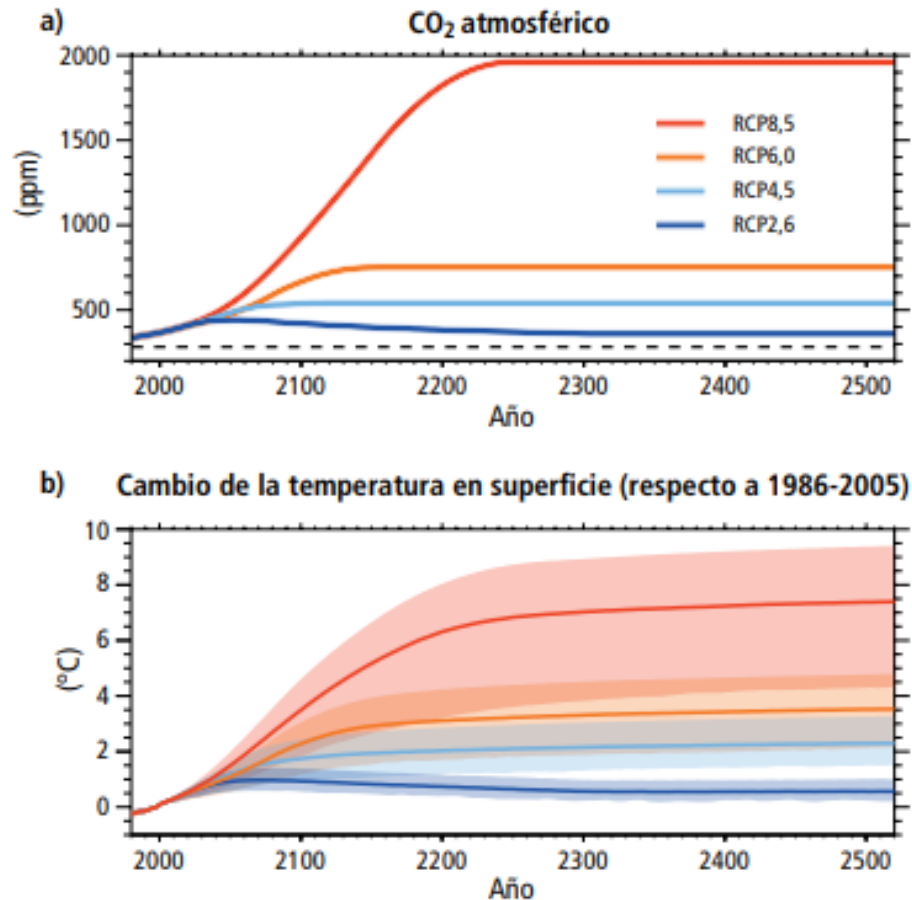


Figura 1. (a) Proyección de CO_2 equivalente en los cuatro caminos de forzamiento radiativo RCP2.6, RCP 4.5, RCP6, RCP8.5 hasta el año 2500. (b) Proyección del cambio de la temperatura en superficie media global simulada para las cuatro trayectorias de concentración representativas (RCP) hasta 2300 (respecto a 1986-2005), seguido por un forzamiento radiativo constante (nivel en el año 2300) (IPCC, 2013)

Asimismo, los escenarios de emisión A1 y A2 son parte de los Escenarios de Concentración Representativa (RCP) previamente mencionados. Estos fueron discutidos en el Tercer Informe de Evaluación (TAR) de 2001 y el Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del IPCC durante el 2007. Dentro del escenario A1, se describió un mundo con un rápido crecimiento económico, una población global que alcanza su punto máximo a mediados de siglo y una rápida adopción de tecnologías más limpias y eficientes. Además, en el escenario A1, existen tres variantes: A1F1 (foco en el uso de combustibles fósiles), A1T (foco en tecnologías más limpias) y A1B (balance entre varias fuentes de energía) (IPCC, 2001).

En contraste, el escenario A2 describe un mundo con una aproximación más fragmentada. Aquí, se aprecian altas tasas de crecimiento poblacional y una menor incorporación de tecnologías limpias, lo que mantiene una dependencia continua de los combustibles fósiles. Este escenario se caracteriza por una mayor disparidad regional en las velocidades de desarrollo económico y progreso tecnológico (Bernstein, *et al.*, 2008).

6.1.2 Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados CMIP

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas en inglés) es una colaboración global que involucra a numerosos institutos de investigación y universidades. El objetivo principal de CMIP es mejorar nuestra comprensión del sistema climático de la Tierra y proporcionar proyecciones más precisas sobre el cambio climático futuro. Los modelos CMIP son simulaciones computacionales sofisticadas que intentan representar la interacción entre diferentes componentes del sistema climático, como la atmósfera, los océanos, la criosfera y la biosfera (Eyring, *et al.*, 2016).

Este proyecto fue establecido en 1995 por el Grupo de Trabajo en Modelos Acoplados (WGCM) del Programa Mundial de Investigación Climática (WCRP por sus siglas en inglés). Gracias a diversos fondos, se tienen diversas fases del CMIP. Inicialmente, CMIP se basó en resultados de modelos climáticos que emplearon un escenario preindustrial y un escenario con un aumento anual del 1% en la concentración de CO₂. En estas simulaciones, hasta 30 modelos acoplados de clima proporcionaron sus resultados. En etapas más recientes del proyecto, como en las fases 20C3M, se incorporaron escenarios más realistas en las simulaciones históricas del clima, se incluyeron simulaciones de climas pasados y se exploraron también escenarios de clima futuro (IPCC, 2021).

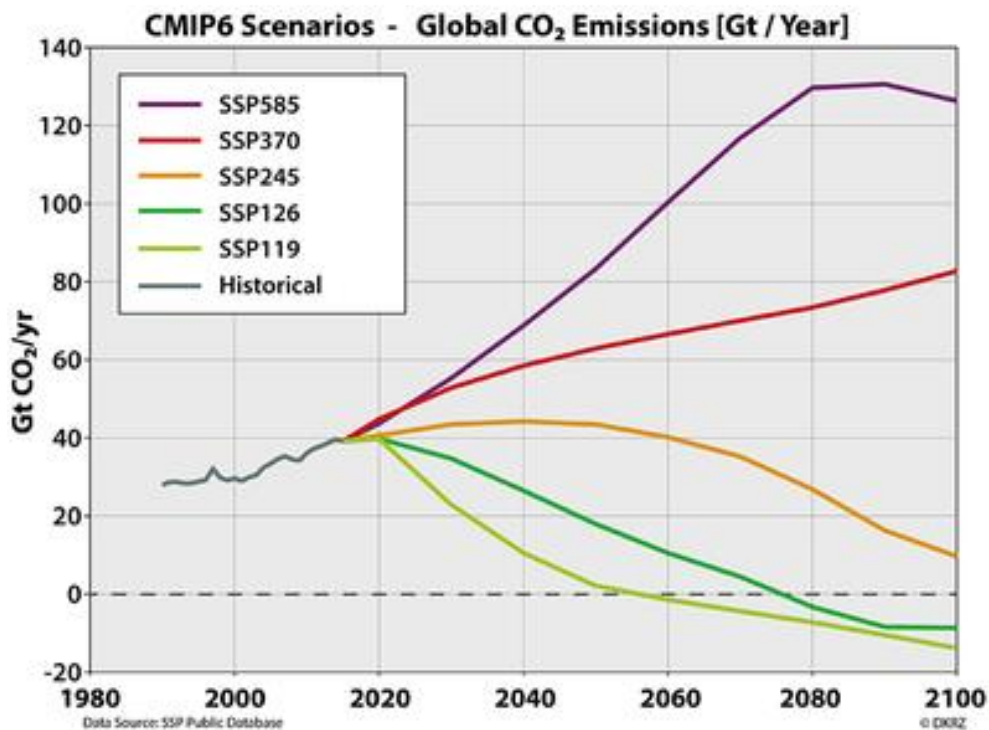


Figura 2. Cinco Escenarios generados del 2 Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) del Cambio de la temperatura de la superficie terrestre (Eyring, *et al.*, 2016)

La planificación de la sexta fase de CMIP comenzó en 2013, justo antes de que finalizara la fase anterior. La descripción detallada del diseño y la estructura de CMIP6 se dio a conocer en 2016. En 2018, se aprobaron 23 proyectos de intercomparación de modelos (MIPs), involucrando a 33 grupos de investigación de 16 países. Además, se establecieron una serie de experimentos comunes para todos los modelos. Se estableció el año 2020 como plazo límite para presentar contribuciones al sexto informe del IPCC (O'Neill, *et al.*, 2016; IPCC, 2021).

6.2 Cambio climático en Guatemala

Guatemala se distingue por presentar una alta variabilidad climática en diversas escalas temporales y espaciales como resultado de sus características biofísicas y ubicación geográfica. Los océanos Pacífico y Atlántico, que rodean el área, tienen un impacto significativo en los patrones climáticos, precipitaciones y teleconexiones (Bardales *et al.*, 2019). Las teleconexiones son interrelaciones entre fenómenos meteorológicos que ocurren en lugares muy lejanos. En Guatemala, fenómenos como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y el Atlántico Tropical Norte (ATN) son las principales teleconexiones con mayor influencia en la región y de las cuales se tiene mejor documentación.

En los últimos años se han registrado una mayor frecuencia de ambos fenómenos, siendo indicios de un cambio inminente en el clima del país. Además de cambios en temperatura, donde según datos reportados por 37 estaciones climáticas distribuidas en el país, para el periodo de 1973-2000, la temperatura promedio anual de Guatemala fue de 23.1 °C y durante el periodo 2001-2019 de 23.9 °C. Indicando un incremento de temperatura general en el periodo actual de 0.8°C (INSIVUMEH, 2020). Asimismo, se han reportado incrementos de entre un 2.2% y 10.3%, en regiones montañosas como la parte alta de Quetzaltenango y Huehuetenango (MARN, 2015; INSIVUMEH, 2018).

Con una estación lluviosa de verano boreal y una estación seca de invierno boreal, Guatemala tiene un clima de precipitaciones estacionales bimodal y un invierno seco en la región boreal. Durante el verano boreal, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que produce precipitaciones, tiene un impacto significativo en la región. La estación lluviosa, caracterizada por tormentas y tempestades, suele comenzar en abril o principios de mayo, con dos picos máximos cerca de junio y septiembre. Entre julio y agosto, existe un periodo de disminución de las precipitaciones conocido como canícula, que puede durar de 5 a 15 días o incluso más (Pons, *et al.*, 2018). Según análisis del MARN (2015), la precipitación anual promedio ha aumentado en todas las regiones del país comparando la línea base (1971-2000) contra el periodo “actual” (2001-2014).

Tanto el incremento en la temperatura y cambios en la precipitación, así como la concurrencia de eventos de teleconexión, evidencian el grado de exposición de Guatemala ante el cambio climático. Inundaciones, sequías y corrimientos de tierra son solo algunos de los desastres naturales que aumentan su probabilidad debido a los cambios en el sistema climático de la región. Guatemala para el 2014 ocupaba la cuarta posición del índice de exposición de la región

latinoamericana, siendo superado únicamente por países insulares como Cuba y Jamaica (Mapplecroft, 2014).

6.3 Impacto de cambio climático en Guatemala

Los impactos del cambio climático en Guatemala son diversos y abarcan diversos sectores, desde el medio ambiente hasta la economía y la salud. En un periodo de 20 años, Guatemala ha sido afectada por más de 15 tormentas extremas que han dejado aproximadamente un millón de personas damnificadas, acompañados de pérdidas millonarias. Un ejemplo claro fue la tormenta tropical Stan durante el 2005, que dejó 664 fallecidos, más de 285,000 damnificados y daños estructurales estimados en 983 millones de dólares estadounidenses (USD). Otro evento catastrófico fue la tormenta Agatha en 2010, la cual cobró la vida de 152 personas, afectando 104,000 personas y causó daños por USD 650 millones (Carrera, 2,019).

El cambio climático no solo interviene en los fenómenos climáticos, también puede impactar agricultura de un país. A lo largo de las últimas décadas, Guatemala ha experimentado un incremento gradual en su temperatura promedio, lo que ha generado estragos en la agricultura y los ecosistemas. Los cultivos esenciales como el maíz y el café, fundamentales para la economía y la seguridad alimentaria del país, se ven amenazados por las olas de calor y las sequías prolongadas. En encuestas a pequeños agricultores realizadas por Harvey, *et al.* (2018) el 95% de los encuestados han observado el cambio climático y la mayoría ya está experimentando impactos del aumento de las temperaturas y eventos climáticos extremos en los rendimientos de cultivos. Observando los mismos la incidencia de plagas y enfermedades, un descenso en la generación de ingresos y, en algunos casos, la seguridad alimentaria. Según el análisis de Biota y TNC (2014), los departamentos con mayor vulnerabilidad relacionada con la agricultura y cambio climático son Totonicapán, Quetzaltenango, San Marcos, Huehuetenango y Quiché. Estos departamentos se encuentran expuestos a múltiples amenazas y a su vez, son los departamentos donde predomina la población indígena (FAO, 2014; INE, 2019).

Además, las variaciones climáticas extremas han aumentado en frecuencia e intensidad. Guatemala ha sido golpeada por sequías devastadoras que ponen en peligro el suministro de agua y aumenta la vulnerabilidad de las comunidades rurales. Estudios realizados durante el 2015 demostraron que todas las cuencas del país están expuestas a modificaciones significativas del clima, por lo que se proyectan cambios en la disponibilidad de agua, como consecuencia de temperaturas más altas y menores tasas de precipitación (CEPAL, *et al.*, 2018; Iarna-URL, 2015b).

Asimismo, otras investigaciones como Pons y colaboradores (2018) encontraron un incremento en el déficit hídrico hacia finales de siglo en regiones secas del país, que también sugiere cambios sustanciales en regiones tradicionalmente húmedas como el sur de Petén o costa sur, donde se concentra la mayoría de la agricultura de subsistencia y la agroindustria. Otros reportes demuestran el 40% de los poblados de todos los departamentos de Guatemala son expuestos a una o más amenazas climáticas. Siendo los departamentos de Quetzaltenango, Retalhuleu, San Marcos, Escuintla y El Progreso los departamentos que presentan los más altos porcentajes de poblados expuestos, siendo superior al 90 % (Perez y Galves, 2020).

La biodiversidad, otra de las joyas de Guatemala, también está sufriendo los embates del cambio climático. La alteración de los patrones climáticos está amenazando hábitats únicos, poniendo en riesgo a especies vegetales y animales endémicas. Los bosques, humedales y áreas protegidas enfrentan graves desafíos para su conservación y preservación, lo que a su vez afecta a las comunidades que dependen de ellos para su subsistencia y su identidad cultural. El cambio climático potenciara las amenazas existentes contra la diversidad biológica en Guatemala, tales como: la contaminación de agua y suelo, la deforestación y la sobreexplotación de especies silvestres (CEPAL, *et al.*, 2018; CONAP *et al.*, 2016). Además, se ha evidenciado una disminución en el índice de biodiversidad potencial (IBP) vinculadas tanto al cambio de clima como la actividad humana (CEPAL, *et al.*, 2018)

Para el país no solo se espera el efecto del cambio climático al medio ambiente, sino se considera su impacto en la salud y el bienestar de la población guatemalteca. El aumento de las temperaturas puede aumentar la propagación de enfermedades transmitidas por vectores. De las 15 enfermedades emergentes transmitidas por vectores reconocidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) a nivel mundial, en el país para el 2016 se reportan cinco: dengue, malaria, la enfermedad de Chagas, chikunguña y zika. Según los casos reportados por MSPAS (2020) la mayor prevalencia de enfermedades vectoriales se presenta en los departamentos donde las temperaturas son mayores y las condiciones más húmedas, tales como Escuintla, Petén, Santa Rosa, Suchitepéquez y Retalhuleu. Debido al cambio de clima, se espera un aumento en el número de casos de dengue. Además, los eventos climáticos extremos causan daños físicos y emocionales, generando pérdidas humanas y económicas que repercuten en la sociedad.

6.4 Servicios Ecosistémicos

El concepto de servicios proporcionados por los ecosistemas tiene sus orígenes en el movimiento ambientalista que surgió en las décadas de 1960 y 1970, a raíz de la denuncia de los impactos negativos de la contaminación, la reducción de la capa de ozono y la deforestación de bosques tropicales (Camacho y Ruiz, 2012). El inminente colapso de los ecosistemas ante los inicios del cambio climático impulsó a la comunidad científica y movimientos ciudadanos a investigar el papel de los ecosistemas en buen estado para el bienestar humano.

Múltiples investigadores han sugerido una amplia variedad de clasificaciones para los servicios ecosistémicos que faciliten su comprensión y potencial intercambio de sus beneficios. Hasta ahora, la clasificación más aceptada es la derivada de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de 2003, que se basa concretamente en “los beneficios que la población obtiene de los ecosistemas”. Bajo este trabajo se obtuvo un sistema de clasificación con propósitos operacionales basado en cuatro líneas funcionales, que incluyen servicios de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales (Camacho y Ruiz, 2012).

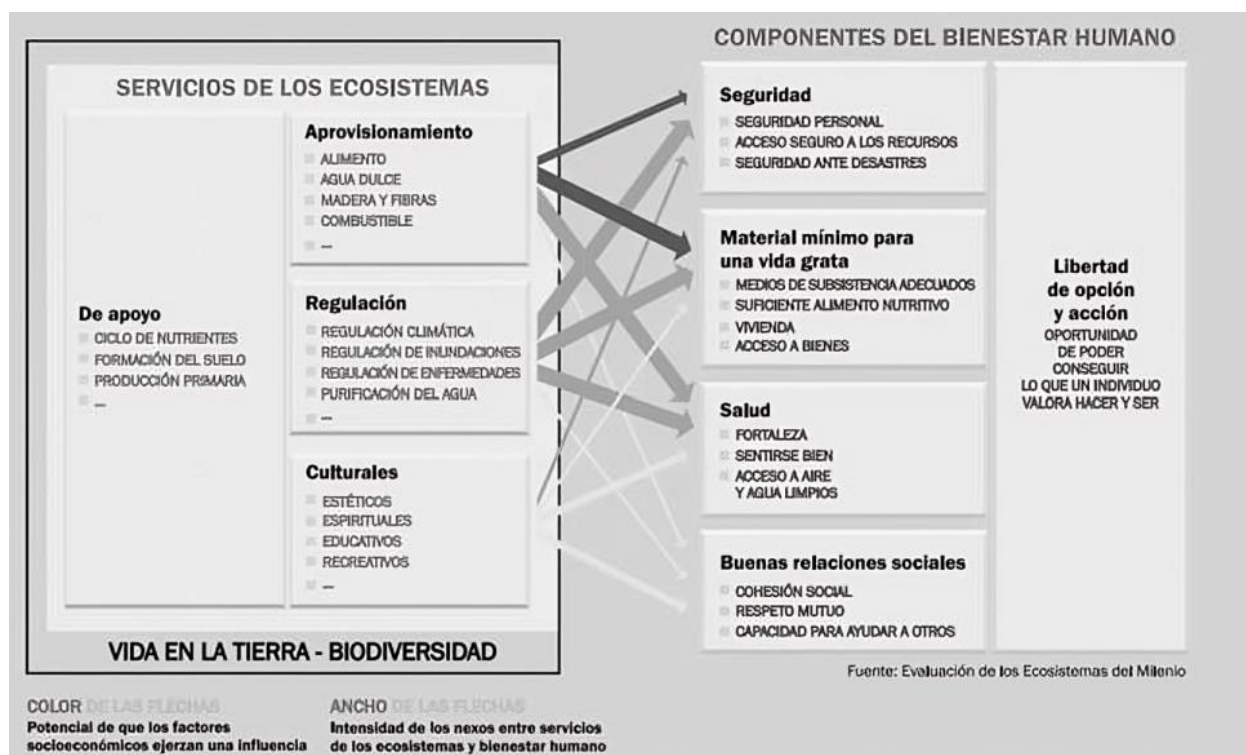


Figura 3. Vínculos entre los Servicios Ecosistémicos y el Bienestar Humano (EM, 2003)

6.4.1 Servicios de soporte

También conocidos como servicios de apoyo, son los bienes naturales necesarios para que los otros servicios ecosistémicos sigan existiendo. Bajo este servicio se clasifica la gestión de espacios vitales para las plantas y animales, conservación de la diversidad genética, formación de suelos y el ciclo de los nutrientes como carbono, nitrógeno y fósforo (FAO, 2022).

6.4.2 Servicios de aprovisionamiento

Los servicios de aprovisionamiento o abastecimiento se interpretan como todos los bienes y productos materiales o comestibles. Agua, madera, alimentos, medicina y otros bienes son algunos de los beneficios que las comunidades obtienen de los ecosistemas. Muchos de estos se comercializan en mercados locales e internacionales, llegando a tener alto valor monetario. Las regiones de bajos recursos y rurales son las que dependen directamente de estos servicios para su subsistencia, llegando a su valor a ser mucho más alto que los precios reflejados en mercado (FAO, 2022).

Dentro del marco conceptual de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2003), el agua se considera tanto como un servicio proporcionado por los ecosistemas como un sistema en sí mismo. Dado que el ciclo del agua desempeña múltiples roles en el clima, la química y la

biología de la Tierra, resulta difícil definirlo de manera distintiva como un servicio de apoyo, regulación o suministro.

6.4.3 Servicios culturales

Son aquellos beneficios no materiales que proporcionan los ecosistemas que sirven para construir la vida social de los seres humanos. Comprenden la inspiración estética, la identidad cultural, el desarrollo cognitivo, la reflexión y la experiencia espiritual relacionada con la naturaleza (EM, 2003). También se incluye dentro de esta clasificación las oportunidades para el turismo y otras actividades recreativas (FAO, 2022).

6.4.4 Servicios de regulación

Engloban todos aquellos bienes y beneficios generados a partir de la capacidad de los ecosistemas para ejercer control sobre aspectos clave como la biodiversidad, la calidad del aire, agua y suelo. Asimismo, abarcan funciones esenciales como la polinización, la mitigación de inundaciones, la influencia en el clima y la gestión de enfermedades. A pesar de su trascendental importancia, estos servicios a menudo pasan inadvertidos o se dan por sentado. Sin embargo, cuando se ven afectados, su impacto repercute en la estabilidad tanto local como regional del ecosistema en cuestión. (FAO, 2022).

Cabe resaltar que la biodiversidad también proporciona servicios ecosistémicos de soporte, que son necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos más directos. Por ejemplo, al influir en la producción primaria y en el ciclo de nutrientes y agua, la biodiversidad respalda indirectamente la producción de alimentos, fibras y refugio (EM, 2003).



Figura 4. Servicios ecosistémicos.

(Earthwise Aware, 2021)

6.5 Servicio de regulación: captura de carbono

La captura o secuestro de carbono destaca como uno de los servicios de vital importancia proporcionados por los ecosistemas forestales. Este proceso puede ser conceptualizado como un servicio ecosistémico de regulación que ejerce un control crucial sobre los procesos ambientales y el cambio climático. En el contexto del secuestro de carbono, esta faceta de regulación ecosistémica se enfoca en la capacidad de los ecosistemas naturales para supervisar el ciclo del carbono, desempeñando así un papel esencial en la mitigación del cambio climático. Los ecosistemas forestales saludables operan como auténticos almacenes de carbono, al absorber el dióxido de carbono durante la fotosíntesis y depositarlo en su biomasa y en el suelo. A través de esta dinámica, se regulan los flujos de carbono en la escala global, evitando su excesiva acumulación en la atmósfera y, consecuentemente, mitigando los efectos del calentamiento global (Ninan y Kontoleon, 2016; Balasubramanian, 2019).

El papel de los bosques en el contexto del cambio climático se manifiesta en diversas facetas, entre las que se destacan: la preservación de los almacenes de carbono; la gestión forestal, que conlleva la utilización racional de los bosques y la constante absorción de carbono; la recuperación de zonas degradadas que han perdido su contenido de carbono; la preferencia por emplear madera en lugar de otros materiales no renovables; y la emisión más eficiente de carbono y la utilización de energía obtenida de la madera, como alternativa a los combustibles fósiles (Sanquetta, Dalla Corte y Benedet Maas, 2011).

Consecuentemente, se perfilan diversas estrategias para la preservación y gestión de los recursos forestales, así como para la incorporación de carbono en los ecosistemas, con el fin de prevenir emisiones y, al mismo tiempo, extraer este carbono de la atmósfera, contribuyendo así a la lucha contra el calentamiento global. La elección de madera sólida o madera procesada y en su estado natural para la obtención de energía evita la liberación adicional de carbono en la atmósfera al optar por materiales sostenibles. De acuerdo con Nutto *et al.* (2002), la madera adquiere el rol de almacenar dióxido de carbono en productos de larga duración. Por ejemplo, una vivienda construida con 50 m³ de madera retiene 12.5 t de C, una cantidad equivalente a 45 toneladas de dióxido de carbono, que se mantendrán resguardadas durante miles de años.

6.6 Mercado de Carbono

El mercado de carbono surge como una respuesta innovadora al desafío del cambio climático, motivado por el creciente reconocimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y su impacto en el calentamiento global. Esta estrategia busca involucrar a los sectores industriales y gobiernos en la reducción de estas emisiones al ofrecer incentivos financieros. Su propósito fundamental es estimular a empresas y gobiernos a disminuir sus emisiones mediante recompensas económicas. Las organizaciones que logran disminuir sus emisiones por debajo de un umbral establecido tienen la oportunidad de vender sus "créditos de carbono" no utilizados a aquellas que superan sus límites, lo que permite una flexibilidad en la reducción de emisiones y fomenta una mitigación eficaz del cambio climático (Calel, 2013).

Según Lino y Marmolejo (2019), el origen del mercado de carbono tuvo lugar con la ratificación del Protocolo de Kyoto en 1997, un acuerdo internacional que fijó metas de reducción de emisiones para naciones desarrolladas. A partir de este marco, surgieron los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) y el Comercio de Emisiones, fundamentos del mercado de carbono. Los MDL permitieron a países desarrollados financiar proyectos de reducción de emisiones en naciones en desarrollo, obteniendo créditos de carbono a cambio. Por su parte, el Comercio de Emisiones implicaba asignar límites de emisiones a industrias y empresas en naciones desarrolladas, quienes podían comprar o vender créditos en función de su rendimiento.

Estos enfoques se concretaron con la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto en 2005, aunque el mercado de carbono enfrentó desafíos como la fluctuación en los precios de los créditos y la necesidad de abordar emisiones en sectores no contemplados. A pesar de esto, ha evolucionado y se ha extendido en diversas regiones, estimulando la adopción de tecnologías limpias y promoviendo la responsabilidad climática. La ratificación del Acuerdo de París en 2015 reafirmó la relevancia de estas iniciativas, impulsando la colaboración global en la reducción de emisiones y la lucha contra el cambio climático (Sanquetta, Dalla Corte y Benedet Maas, 2011).

Paralelamente, REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación) se presenta como un enfoque integral en la lucha contra el cambio climático, centrando su atención en la preservación y el manejo sostenible de los bosques. El origen de REDD+ se remonta a las discusiones en torno al Protocolo de Kyoto durante la década de 1990. Su enfoque se dirige principalmente hacia naciones en desarrollo que enfrentan altos índices de deforestación y degradación forestal. El propósito principal de REDD+ es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al conservar los bosques y su capacidad para retener carbono. Además de su enfoque en la reducción de emisiones, REDD+ coloca énfasis en la salvaguarda de la diversidad biológica, la mejora en la administración forestal y la promoción de beneficios socioeconómicos para las comunidades locales (UNEP, 2018).

6.6.1 Iniciativas del Mercado de Carbono en Guatemala

En respuesta a la creciente urgencia de abordar el cambio climático, Guatemala ha iniciado la exploración y adopción de enfoques innovadores, como los mercados de carbono, para hacer frente a este desafío global. Los mercados de carbono se presentan como una estrategia que no solo busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueve la conservación ambiental y el desarrollo sostenible. En este contexto, Guatemala ha puesto en marcha iniciativas que no solo apuntan a mitigar su huella de carbono, sino también a generar incentivos económicos a través de la comercialización de créditos de carbono. Esto contribuye al cumplimiento de sus compromisos climáticos y a la salvaguarda de sus valiosos recursos naturales.

En el año 2007, se inicia el Proyecto GuateCarbon en Guatemala. Durante ese periodo, se formaliza el Convenio de Cooperación Técnica No Reembolsable ATN/ME 10610-GU en colaboración entre Rainforest Alliance, Inc. y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). El

propósito de este acuerdo es ejecutar el "Programa de Servicios Ambientales de la Reserva de la Biósfera Maya (RBM)", que busca establecer un sistema de pagos por servicios ambientales (CONAP, 2021).

Asimismo, durante el año 2021 se pone en marcha el Programa de Reducción de Emisiones de Guatemala, cuya primera reunión de participantes estableció una ambiciosa meta de reducir 10.5 millones de Toneladas de Dióxido de Carbono (CO₂ eq) para el año 2025. Programa que según el acuerdo con el Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF) del Banco Mundial, proporcionará hasta US\$52,5 millones en pagos por reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal, así como por el aumento de la captura de carbono (REDD+) (CONAP, 2021).

Además del Proyecto GuateCarbon, Guatemala ha estado evaluando la posibilidad de desarrollar más proyectos de mitigación relacionados con el carbono. Entre estos se incluyen programas de incentivos forestales, como la Ley de Fomento al Establecimiento, Recuperación, Restauración, Manejo, Producción y Protección de Bosques en Guatemala, conocida como Ley Probosque, que busca aumentar la cobertura forestal del país. Sin embargo, al igual que varios otros programas, esta iniciativa enfrenta desafíos financieros. Por este motivo, se está considerando implementar un proyecto de Pago por Servicios Ambientales (PSA) compuesto por diversas fuentes de financiamiento que permitan su autosuficiencia. Entre estas fuentes se encuentran los Bonos de Carbono (Velásquez, 2016).

Los Bonos de Carbono o Bonos Verdes son certificados que representan la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y su nombre se deriva de su función de cuantificar esta reducción. Estos bonos surgen a partir de acuerdos internacionales o certificaciones privadas que establecen mecanismos para garantizar la absorción de gases de efecto invernadero. Estos certificados no solo cumplen una función social, sino también económica, ya que pueden ser objeto de comercio en el Mercado de Carbono, como es el caso del Chicago Climate Exchange (CCX). Dentro de este mercado, se realizan transacciones de dos tipos de bonos: los regulados y los voluntarios. Los primeros tienen su origen en tratados internacionales, en particular en el Protocolo de Kyoto. Sin embargo, a pesar de la existencia de una normativa internacional que exige la reducción de emisiones, esto no garantiza el funcionamiento efectivo de este sistema (Nasi, *et al.*, 2011; UNFCCC, 2004).

Por otro lado, los créditos voluntarios, que han sido valorados de manera más efectiva, han sido presentados como un sistema flexible. Se denominan "voluntarios" porque quienes los adquieren en su mayoría son individuos particulares que, sin tener obligaciones derivadas de acuerdos formales, los adquieren de manera voluntaria. Su interés en reducir los niveles de carbono en la atmósfera surge de una responsabilidad corporativa o ambiental. Debido a su naturaleza, la implementación de Bonos de Carbono Voluntarios en Guatemala sería la opción más adecuada (Velásquez, 2016; Nasi, *et al.*, 2011).

Cabe resaltar que los principales desafíos en el mercado de carbono en Guatemala abarcan diversos aspectos que requieren atención y resolución. Uno de los principales desafíos es la falta de infraestructura y capacidad técnica para desarrollar y gestionar proyectos de reducción de

emisiones que cumplan con los estándares internacionales. La implementación exitosa de proyectos de carbono requiere la medición precisa de las emisiones y la verificación de los resultados, lo cual puede ser difícil sin una infraestructura adecuada y personal capacitado (Robles, *et al.*, 2000).

Además, la falta de conciencia y comprensión generalizada sobre los mercados de carbono representa otro obstáculo. Tanto el sector público como el privado necesitan una mejor comprensión de cómo funcionan los mecanismos de mercado de carbono, así como los beneficios que pueden derivarse de su participación. Esto implica la necesidad de campañas educativas y programas de sensibilización para fomentar una mayor adopción y participación en estas iniciativas (Nasi, *et al.*, 2011).

La incertidumbre en los precios de los créditos de carbono también es un desafío significativo. Los precios pueden ser volátiles debido a factores económicos, políticos y regulatorios, lo que puede afectar la rentabilidad de los proyectos de reducción de emisiones. Esta incertidumbre puede desalentar la inversión y el compromiso a largo plazo en el mercado de carbono (Nasi, *et al.*, 2011).

Otro desafío es la necesidad de una mayor colaboración entre diferentes sectores y actores. La implementación efectiva de proyectos de carbono requiere la cooperación entre el gobierno, el sector privado, las comunidades locales y las organizaciones no gubernamentales. La falta de coordinación y colaboración puede dificultar la implementación y el éxito de estos proyectos.

6.7 Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”

La Reserva Refugio del Quetzal se encuentra en las laderas sur del volcán Atitlán, en el municipio de Santa Bárbara, Suchitepéquez, con una altitud que oscila entre 1,179 y 2,574 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo con Monzón y Dix (2018), los bosques se dividen en Bosque Tropical de Pre-Montaña hasta los 1400 metros de altura, y en la parte más alta, Bosque de Montaña Baja debido a la cantidad de precipitaciones (7,000 mm por año). A altitudes medias y bajas se encuentra un bosque nuboso, con algunas especies caducifolias pero principalmente perennes.



Figura 5. Volcán Atitlán municipio Santa Bárbara, Suchitepéquez.
(Monzón, 2022)

La Reserva Refugio del Quetzal es un espacio de conservación gestionado por el Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad (CEAB-UVG). El propósito de esta reserva es proporcionar un entorno natural para la realización de investigaciones, estudios de campo y proyectos de conservación, brindando a estudiantes de biología y disciplinas afines de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) la oportunidad de adquirir experiencia práctica y conocimientos en un ambiente real. Mediante la posesión de esta reserva privada, la UVG también contribuye activamente a la preservación de la biodiversidad y los ecosistemas naturales de Guatemala (Barrera, 2023).

6.8 Bosque Nuboso

Comparable a una selva tropical, el bosque nuboso es uno de los ecosistemas con mayor diversidad biológica. Distribuido en una franja latitudinal entre 1,000 y 2,700 msnm, se caracteriza por una cobertura de nubes estacional o persistente. Además de contar con lluvia horizontal, un fenómeno donde la precipitación aumenta debido a la neblina interceptada por la vegetación. Los bosques nubosos son ecosistemas únicos que albergan una variedad de organismos altamente especializados, a menudo adaptados a condiciones de niebla, como: epifitas, musgos, helechos,

orquídeas, pequeños anfibios, reptiles e insectos (Hamilton, Bruijnzeel, & Scatena, 2010). Los árboles que conforman este tipo de bosque tienden a tener una altura reducida y mayor densidad de dosel, adaptación que es de utilidad para la captación de neblina, y, por ende, agua (Los, Street-Perrott y Loader, 2021).

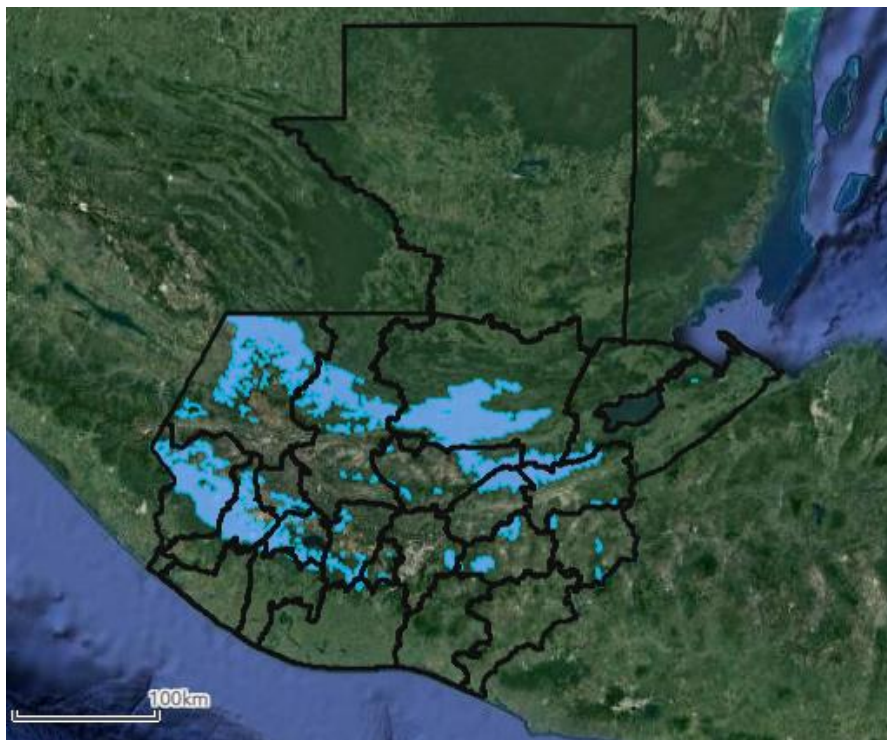


Figura 6. Distribución nacional ecosistema bosque nuboso (INAB, 2023)

Hoy día, los bosques nubosos se ven afectados negativamente por acciones humanas, siendo la tala rasa y uso de los bosques como fuente de forraje para ganado las actividades de mayor impacto. Otras acciones como la extracción de leña, alimentos y medicinas tienen un impacto menor, el cual puede ser mediado con un manejo adecuado de recursos naturales. Asimismo, la reducción en la densidad del dosel de los árboles, relacionado a las actividades humanas previamente mencionadas, tienen un efecto reductor en la capacidad de los árboles para capturar neblina. Impacto negativo que se ve afectado también por el cambio climático, siendo el calentamiento global una potencial amenaza al elevar la formación de nubes sobre la franja latitudinal que se encuentran estos bosques (Los, Street-Perrott y Loader, 2021).

6.8.2 Diversidad biológica del Bosque Nuboso

Siguiendo el sistema de zonas de vida Holdridge, Guatemala cuenta con 14 zonas distintas. El bosque nuboso en el país se divide en Bosque muy húmedo montano bajo subtropical y Bosque montano bajo subtropical. Cabe resaltar que Holdridge (1967) clasifica a este ecosistema como

bosque muy húmedo montano bajo tropical (bmh-MBT). A pesar de sus diversas clasificaciones, para la identificación de estos tipos de bosque se utilizan especies forestales indicadoras. De la Cruz (1982) identifica para Guatemala:

- *Engelhardtia* sp.
- *Podocarpus oleifolius* D. Don
- *Oreopanax xalapensis* (Kunth) Deene. y Planch
- *Hedyosmum mexicanum* C. Cordem
- *Billia hippocastanum* Peyr.
- *Magnolia guatemalensis* Donn. Sm.
- *Brunellia mexicana* Standl.
- *Gunnera mexicana* Brandegee
- *Alfaroa costaricensis* Standl.

Dentro del bosque nuboso existe una alta diversidad de flora y fauna, sobretodo organismos que habitan en el dosel como reptiles y epifitas. Según Campbell (1983) en el bosque nuboso de Sierra de las Minas se han reportado un total de 110 especies de hepetofauna. Otros estudios realizados en el corredor de bosque nuboso entre el Biotopo del Quetzal y la Sierra de las Minas por la Universidad San Carlos de Guatemala han demostrado también diversidad de mamíferos. Capturando 11 especies del orden Rodentia, 1 especie de Insectiva y 1 especie de Marsupialia, entre los organismos cabe mencionar: *Peromyscus grandis*, *Nyctomys sumichrastis*, *Heteromys desmaretians*, *Reithrodontomys mexicanus* y *Marmosa mexicana* (CECON-USAC, 2002). El bosque nuboso alberga mamíferos de mayor tamaño, como el puma (*Puma concolor*), jaguar (*Panthera onca*) y dos especies de venados (*Odocoileus virginianus*, *Mazama americana*), entre otros (Serrano, 2019).

También aloja múltiples especies de aves, teniendo estudios en el bosque nuboso de Alta Verapaz que han reportado 142 especies de aves de las cuales, 42 son endémicas de Mesoamérica y 14 de Centro América. Además 4 se encuentran dentro la lista roja de especies en peligro de extinción de la IUCN. Asimismo, este ecosistema hospeda el ave nacional, el Quetzal (*Pharomachrus mocinno*) y el pavo de cacho (*Oreophasis derbianus*) (Eisermann & Schulz, 2005).

Un estudio realizado por Schuster, Cano y Cardona (2000) encontró 66 especies de Passalidae en 32 bosques nubosos de Guatemala. Lo que representa el 80% del total de 82 especies que conocidas de Guatemala. Las localidades con mayor riqueza de especies corresponden a Purulhá, Baja Verapaz (13 especies), Laj Chimel, Uspantán, Quiché (11), La Unión, Zacapa (10), Sierra de Caral, Izabal (10), Río Zarco, RBSM (9) y Yalambojoch, Huehuetenango (9). Los mismos autores establecieron un método de evaluación rápida que evalúa riqueza de especies, endemismo y similitud entre ensamblajes de pasálidos y el grado de protección de los bosques para priorizar la conservación de estos. Sugiriendo siete sitios de muy alta prioridad y cinco sitios de alta prioridad para protección en Guatemala.

6.8.2 Servicios ecosistémicos del bosque nuboso

El cambio en la percepción del valor total del bosque nuboso y como debe ser utilizados está marcado por una concienciación creciente sobre la importancia de los servicios ecosistémicos. La evaluación económica de los servicios ecosistémicos proporcionados por este tipo de bosque se ha centrado en cuatro bloques fundamentales: biodiversidad, fijación de carbono, ciclo

hidrogeológico, educación y turismo (Pérez, Fernández y Sayer, 2007). Todos estos servicios pueden ser clasificados dentro de aprovisionamiento, regulación, soporte y culturales (Higuera, Martín-López y Sánchez-Jabba, 2013).

Como servicios de soporte, aprovisionamiento y regulación tenemos principalmente la recarga hídrica que representa este tipo de bosque gracias a la precipitación horizontal, pudiendo incorporar hasta un 10% de agua adicional y nutrientes a ecosistemas marinos cercanos. Asimismo, el bosque nuboso representa una importante fuente de recursos para la vida cotidiana y tradiciones culturales de las poblaciones locales. Estudios realizados en la Finca Pamac II, Alta Verapaz han demostrado la importancia de múltiples especies forestales usando como referencia el índice de valor de importancia (IVI), tales como: *Quercus* spp. *Calyptrocalyx macrantha* y *Prunus lundelliana* (Serrano, 2019).

Por su alta diversidad de especies y frondosos árboles, el bosque nuboso representa una oportunidad de turismo sostenible. Actividades como la observación de aves, fotografía de la naturaleza y senderismo son opciones viables bajo un manejo responsable (Pérez, Fernández y Sayer, 2007).

6.8.3 Métodos para determinación de servicios ecosistémicos

Uno de los desafíos más importantes para hoy y el futuro próximo, es mantener e incrementar los beneficios y contribuciones que la naturaleza provee a las personas, y su impacto positivo a la calidad de vida. En este contexto, el concepto de servicios ecosistémicos y capital natural, se han ido integrando al lenguaje científico y político. Aunque son conceptos intuitivamente comprendidos, su puesta en práctica es todavía un desafío (Centro de Ecología Aplicada, 2018).

A lo largo de los años, se han realizado evaluaciones de servicios ecosistémicos a escala global, siendo la primera el Millenium Ecosystem Assessment (MEA), cuyo objetivo fue recopilar información sobre el estado de los ecosistemas enfocándose principalmente en los beneficios y servicios que dejaríamos de recibir si la degradación de estos persistiera en la escala actual. En esa ocasión, el MEA entre 2000 a 2005 realizó una valoración económica de los servicios ecosistémicos, mediante literatura científica, revisión de bases de datos y modelos científicos. Diez años después se forma el IPBES (Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas), cuyo marco conceptual presenta diferencias con el MEA principalmente al reconocer el rol central que la cultura tiene sobre la conceptualización de los beneficios que la sociedad recibe de la naturaleza (Centro de Ecología Aplicada, 2018).

Grêt-Regamey *et al* (2017) demuestra se ha desarrollado una gran diversidad de herramientas y metodologías para la evaluación de servicios ecosistémicos, identificando 68 diferentes herramientas. Éstas abarcan un amplio rango de formatos, desde instrumentos simples como pdfs interactivos, a complejos modelos computacionales. Incluye además herramientas ampliamente usadas, tales como InVest o MIMES que fueron desarrolladas en colaboración con

Organizaciones No Gubernamentales (ONG) así como también herramientas con fuerte apoyo de agencias de gobierno, como EnviroAtlas o ESP-VT.

6.9 Metodología Sistemas de Información Geográfica

Otra herramienta que ha sido utilizada recientemente para la medición SE son los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Desde la década de 1970, los datos de observación de la superficie terrestre se han recopilado continuamente en varios espectros espaciales y resoluciones temporales. SIG es una herramienta tecnológica de gran utilidad que posibilita la captura, almacenamiento, administración, análisis y representación de datos geoespaciales, es decir, información relacionada con ubicaciones en la superficie terrestre. Mediante la combinación de datos geográficos y atributos no espaciales, los SIG generan mapas digitales y modelos que enriquecen la comprensión y la toma de decisiones basadas en las conexiones espaciales entre distintos elementos (Longley, *et al.*, 2015).

Ampliamente empleado en diversos ámbitos como la cartografía, la planificación urbana, la gestión del entorno, la agricultura, la salud pública, la ingeniería civil y la administración de recursos naturales, los SIG facilitan la visualización de información mediante mapas y gráficos, facilitando la detección de patrones, tendencias y relaciones entre variables geográficas. Este enfoque robusto y visual impulsa la identificación de soluciones y respuestas en una variedad de disciplinas. Actualmente, su accesibilidad, calidad, y el alcance han ido mejorando continuamente, por lo que es una fuente de información fundamental en el estudio cambio de uso de suelo y visualización de la superficie de la Tierra, así como datos importantes en la investigación de monitoreo de actividades humanas (Wang, *et al.*, 2021).

El método SIG toma en cuenta tanto la creación como la representación de datos en capas llamadas raster o vectoriales. Los raster se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor. Se trata de un modelo de datos muy adecuado para la representación de variables continuas en el espacio. Asimismo, las capas vectoriales se centran en la precisión de la localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir, de límites definidos. Cada una de estas geometrías está vinculada a una fila en una base de datos que describe sus atributos (Wang, *et al.*, 2021; Zhang, *et al.*, 2015).

6.9.1 Modelamiento espacial utilizando variables ambientales

El modelamiento espacial implica la utilización de herramientas de análisis y software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para comprender y predecir fenómenos geográficos o ambientales en función de variables espaciales y datos geoespaciales. Permite modelar la distribución de variables ambientales, como temperatura, precipitación o calidad del aire, así como

fenómenos geográficos complejos, como la expansión urbana, la propagación de enfermedades o la distribución de especies en un ecosistema (Hijmans, *et al.*, 2005)

Según Bolstad y Manson (2008), el primer paso consiste en recopilar datos geoespaciales relevantes para el estudio. Estos datos pueden incluir información sobre variables ambientales, como precipitación, temperatura, elevación, vegetación, uso del suelo y cualquier otro dato que pueda influir en el fenómeno que se está modelando. Estos datos pueden provenir de diversas fuentes, como satélites, estaciones meteorológicas, sensores remotos, encuestas de campo, bases de datos públicas y otros recursos. Luego, dentro del software SIG seleccionado, los datos se organizan en capas temáticas que representan diferentes aspectos geográficos. Cada capa representa una variable ambiental específica, como la temperatura promedio anual o la distribución de la vegetación. Estas capas se superponen en el SIG para crear un modelo espacial.

En cuanto al análisis espacial, dependiendo de la plataforma SIG, se dispone de una variedad de herramientas que permiten realizar análisis de proximidad, interpolación, densidad, cobertura, entre otros. Estos análisis son útiles para comprender las relaciones espaciales entre las variables ambientales y para identificar patrones o tendencias. Posteriormente, se procede con la modelación espacial mediante la aplicación de diversos modelos estadísticos y matemáticos, como la regresión espacial, el análisis de redes o modelos de máxima verosimilitud. Finalmente, se realiza la validación de modelos y la presentación de resultados a través de mapas y gráficos (Bolstad y Manson, 2008).

6.9.2 Mapas de cobertura forestal y uso de suelo

Los mapas de cobertura forestal y uso de suelo desempeñan un papel crucial en la gestión y conservación de los ecosistemas forestales al proporcionar una representación visual y cuantitativa de la distribución y extensión de la vegetación en áreas geográficas específicas. Estos mapas, creados mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), son herramientas esenciales en diversas aplicaciones, desde la planificación del uso del suelo hasta la monitorización de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático (Eastman y He, 2020).

La cobertura forestal es un componente fundamental de los paisajes terrestres, con un papel crítico en la regulación del ciclo del agua, la captura de carbono atmosférico, la prevención de la erosión y la preservación de la biodiversidad. En un contexto de creciente preocupación por el cambio climático y la pérdida de biodiversidad, estos mapas se han convertido en herramientas imprescindibles para evaluar la salud de los bosques y la calidad de los ecosistemas forestales, identificar áreas de conservación prioritarias y hábitats en peligro de extinción, y facilitar la planificación del uso sostenible del suelo (Abebe, Getachew y Ewunetu, 2022).

Para crearlos, se emplean imágenes de satélite, proporcionadas por el satélite Landsat, que ofrecen datos actualizados y detallados sobre la vegetación, sometidas a un proceso de preprocesamiento para corregir posibles imperfecciones, como efectos atmosféricos y topográficos. Posteriormente, las imágenes se segmentan en segmentos más pequeños y se aplican

técnicas de clasificación supervisada o no supervisada para identificar áreas de cobertura forestal. Finalmente, se realizan ajustes y mejoras para eliminar ruido y errores, generando mapas precisos y útiles (Bolstad y Manson, 2008).

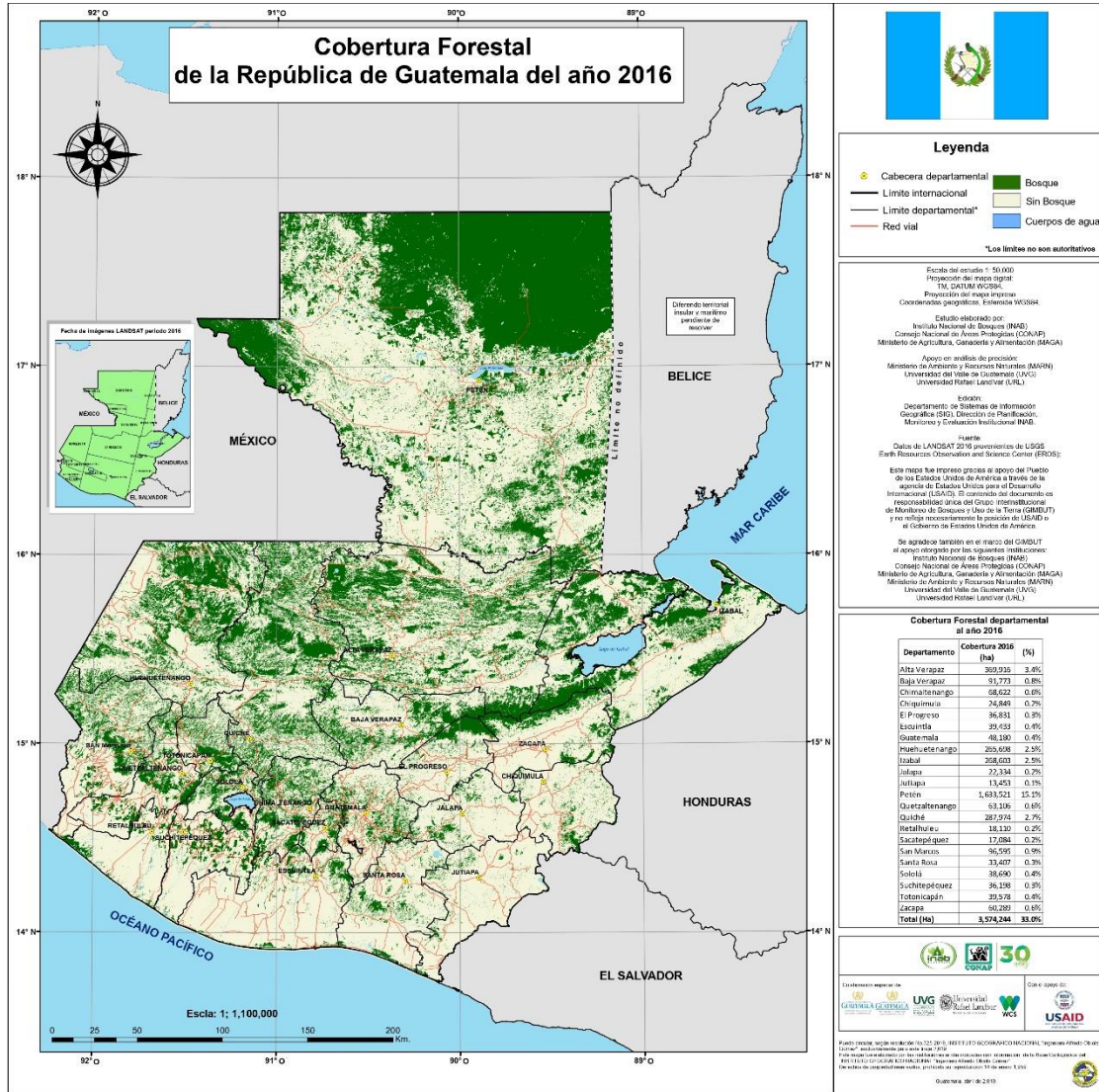


Figura 7. Mapa de cobertura forestal de la República de Guatemala del año 2016 (IARNA, 2019)

6.9.3 Mapas de reservas de carbono vegetal

Los mapas de reservas de carbono vegetal desempeñan un papel esencial al proporcionar información crucial sobre la salud de los ecosistemas, las consecuencias de los cambios en el uso del suelo y la efectividad de las estrategias de gestión del carbono. Estos mapas son herramientas poderosas para los responsables de la toma de decisiones involucrados en la mitigación y

adaptación al cambio climático. Políticos, gestores de tierras y conservacionistas los utilizan para identificar áreas con importantes reservas de carbono, priorizar proyectos de conservación y desarrollar estrategias de uso sostenible de la tierra. Además, los mapas de carbono permiten evaluar iniciativas de captura de carbono, validar medidas de reducción de emisiones y monitorear cambios a lo largo del tiempo (Capitani, *et al.*, 2018).

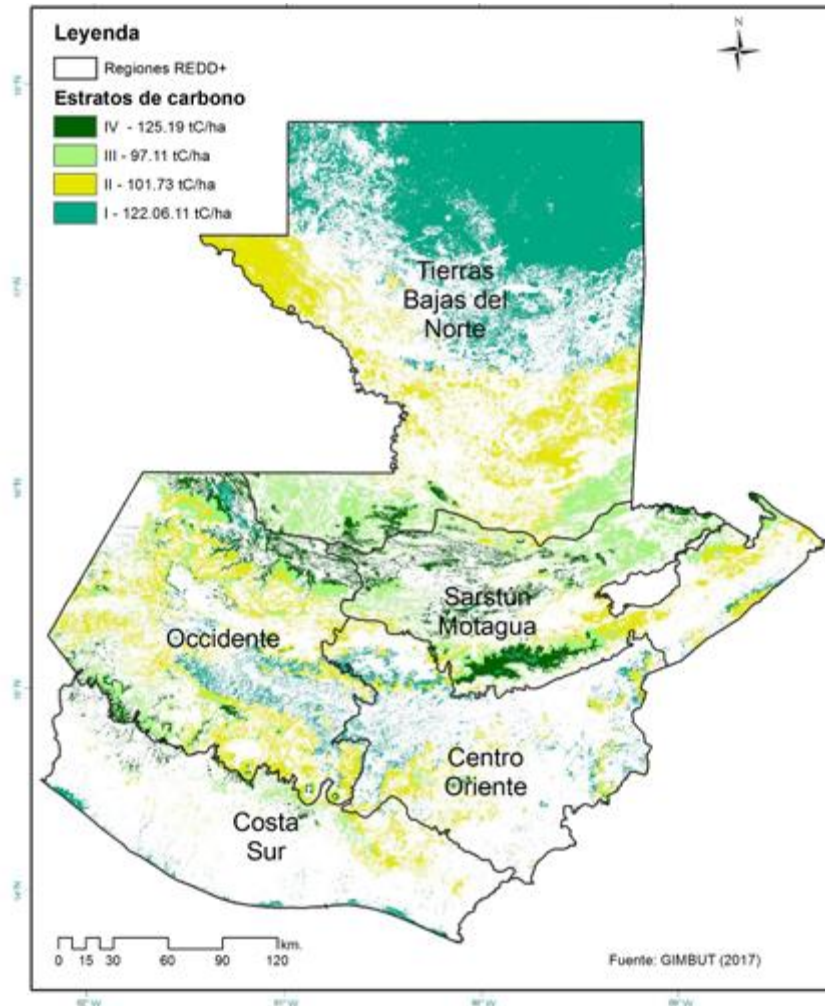


Figura 8. Estratificación de Carbono (tC/ha) en la cobertura forestal del año 2010 (Gómez, 2017)

La generación de mapas de carbono mediante la teledetección o SIG proporciona una manera eficiente de muestrear uniformemente el paisaje a intervalos regulares y a menudo sin costos significativos para los usuarios. Sin embargo, es esencial destacar que los instrumentos de teledetección no miden directamente la biomasa, sino que ofrecen estimaciones indirectas. Este proceso, similar al descrito previamente, incluye la recopilación y pre-procesamiento de datos pertinentes con imágenes satelitales, la creación de capas temáticas que representan aspectos como la biomasa vegetal y el uso del suelo, seguido de análisis espaciales para estimar la distribución

del carbono. Estos mapas desempeñan un papel valioso en la toma de decisiones relacionadas con la gestión forestal, la mitigación del cambio climático y la conservación ambiental, y requieren actualizaciones periódicas para reflejar cambios en el tiempo (Gómez, 2017).

6.9.4 Valorización económica de variables SIG relacionadas con los servicios ecosistémicos

Las variables SIG relevantes que están relacionadas con servicios ecosistémicos pueden variar según el servicio específico que se esté evaluando y la ubicación geográfica. Una de las principales es la cobertura vegetal, que representa la cantidad y el tipo de vegetación en una determinada área. Es fundamental para evaluar servicios como la provisión de hábitats para la biodiversidad, la regulación de la temperatura y la captura de carbono. Desde un punto de vista económico, este último servicio mencionado puede calcularse utilizando los precios del mercado de carbono o el costo de evitar emisiones de carbono (Costanza, *et al.*, 2014).

Otra variable que se relaciona con SIG es el uso del suelo, la cual muestra cómo se utiliza el suelo en una determinada área, ya sea para agricultura, urbanización, bosques, humedales, etc. Es importante destacar que el uso del suelo tiene un impacto significativo en la capacidad de un ecosistema para proporcionar servicios. Además, el clima es una variable relevante, ya que la información sobre patrones climáticos, temperatura, precipitación y variabilidad climática puede influir en servicios como la regulación del clima y la mitigación de eventos climáticos extremos, lo que, a su vez, puede modificar el valor económico de estos servicios (De Groot, *et al.*, 2012).

VII. METODOLOGÍA

7.1 Sitio de estudio

El trabajo de campo previo para obtener los datos espaciales fue realizado dentro de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”. Esta se encuentra en las laderas sur del volcán Atitlán, en el municipio de Santa Bárbara, Suchitepéquez, con una altitud que oscila entre 1,179 y 2,574 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo con Monzón y Dix (2018), los bosques se dividen en Bosque Tropical de Pre-Montaña hasta los 1400 metros de altura, y en la parte más alta, Bosque de Montaña Baja debido a la cantidad de precipitaciones (7,000 mm por año). El sitio consta de más de mil hectáreas (22.38 caballerías).

Se realizó un polígono de la Reserva utilizando la herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) *QGIS versión 3.32.3* utilizando las coordenadas espaciales del área natural (Figura 8).

7.2 Fuente de datos

Los mapas utilizados como referencia se tomaron de fuentes oficiales. Para los años 2016, 2050 y 2080, se utilizaron los mapas nacionales de zonas de vida contenidos en el documento "Ecosistemas de Guatemala basado en el sistema de clasificación de zonas de vida", que fue elaborado por el Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad de la Universidad Rafael Landívar en 2018. Además, se recopilaron los mapas de cobertura forestal para la Reserva correspondientes al período 2001-2020 a partir de los mapas nacionales de cobertura proporcionados por el Instituto Nacional de Bosques (INAB). El mapa que incluye información sobre el contenido y estratos de carbono se obtuvo de la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONAP) según el trabajo realizado por Gómez en 2017.

7.3 Elaboración de mapas de cambio de cobertura forestal futuro utilizando el software TerrSet

Se empleó el software de Monitoreo y Modelado Geoespacial TerrSet 2020 para examinar la evolución de la cobertura forestal en la Reserva en el futuro. Esto se llevó a cabo utilizando como base de entrenamiento el algoritmo DecisionForest (RDF) en los mapas base de cobertura forestal desde el año 2001 hasta el 2020. Se generaron dos conjuntos de mapas, uno para el año 2050 y otro para el 2080, cada uno de los cuales representaba la probabilidad de pérdida de bosque en dos escenarios distintos: uno con una probabilidad del 10% y otro con una probabilidad del 20% en cada posible futuro. Esto permitió explorar diferentes niveles de riesgo y evaluar cómo podrían afectar la crisis climática, políticas de conservación y manejo forestal en la Reserva.

Adicionalmente, se utilizó un raster sobre la distancia del bosque hacia los caminos más cercano, como tercera variable adicional.

7.4 Elaboración de mapas de zonas de vida futuros Reserva Refugio del Quetzal

Se empleó la herramienta SIG QGIS en su versión 3.32.3 para delimitar las zonas de vida correspondientes a los años 2016, 2050 y 2080. Estas delimitaciones se llevaron a cabo utilizando como base el mapa proporcionado por IARNA en 2018. Posteriormente, se extrajo la información necesaria de la Reserva Refugio del Quetzal a partir del shapefile del mapa nacional base.

7.5 Análisis económico de stock de carbono Reserva Refugio del Quetzal

Se recopilaron los datos de estratificación de carbono (tC/ha) disponibles en el "Informe metodológico para la elaboración del mapa de estratos de Carbono" (Gómez, 2018). A continuación, se extrajo la información específica relacionada con la Reserva, la cual se incorporó al mapa junto con los datos obtenidos de las zonas de vida a través de la herramienta de intersección en QGIS.

Una vez recopilados los datos sobre la cantidad de carbono almacenado en la reserva del cuadro de atributos, se procedió a convertirlos en unidades monetarias en Quetzales en Microsoft Excel 2016 teniendo en cuenta los precios vigentes en el mercado de carbono de USD 5 por tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) según el documento "Metodología para la estimación del precio social del carbono en Chile y los países de América Latina y el Caribe" realizado por Mena (2021). Para ello, se transformaron las toneladas de carbono por hectárea en toneladas equivalentes de dióxido de carbono, las cuales son utilizadas en el cálculo de los pagos de bonos verdes por la captura de carbono. De esta manera, se obtuvieron datos en unidades monetarias que representan el almacenamiento de carbono para los años 2016, 2050 y 2080.

El cálculo de una tonelada de carbono por hectárea a CO_2 equivalente (CO_2e) se realizó mediante una conversión que tiene en cuenta las diferencias en el peso molecular entre el carbono (C) y el dióxido de carbono (CO_2). El carbono puro tiene un peso molar de aproximadamente 12 gramos por mol (g/mol), mientras que el CO_2 tiene un peso molar de alrededor de 44 g/mol. Para realizar esta conversión, se utiliza un factor de equivalencia que establece que una tonelada de carbono es igual a 3.67 toneladas de CO_2 , debido a la proporción entre sus pesos moleculares. Por lo tanto, para obtener el equivalente en CO_2e , simplemente multiplicamos la cantidad de carbono en toneladas por este factor (Mena, 2021).

Además de la información relacionada con el carbono, se generaron datos sobre la distribución de zonas de vida para la reserva correspondientes a cada uno de los años mencionados.

Es importante destacar que el precio del carbono, por ende CO_2e , es altamente variable y puede experimentar fluctuaciones significativas en el mercado, influido por diversos factores.

Entre estos factores se encuentran los cambios en la economía global. Al crecer la economía crecen las emisiones y por ende el precio del carbono sube, y si la economía global decrece se reducen las emisiones y el precio se reduce o se estanca. Es decir que existe una relación directa entre las condiciones globales de la economía y el precio del carbono. Otros factores que influyen son las políticas gubernamentales, la oferta y la demanda de créditos de carbono, los acuerdos internacionales relacionados con la reducción de emisiones, la percepción del riesgo asociado al cambio climático y la adopción de tecnologías limpias. Además, los eventos climáticos extremos y las crisis económicas pueden ejercer influencia sobre la percepción y el valor del carbono (Ji, Hu y Tang, 2018).

La dinámica del mercado de carbono puede verse significativamente influenciada por la implementación de nuevos marcos regulatorios, como los impuestos al carbono o los sistemas de comercio de emisiones, lo que puede provocar tanto aumentos como disminuciones en el costo del carbono. En este contexto, es esencial destacar que la variabilidad del precio del carbono a nivel internacional subraya la importancia de establecer en Guatemala una gestión sólida y adaptable para abordar los desafíos que plantea este mercado en constante evolución (Velásquez, 2016).

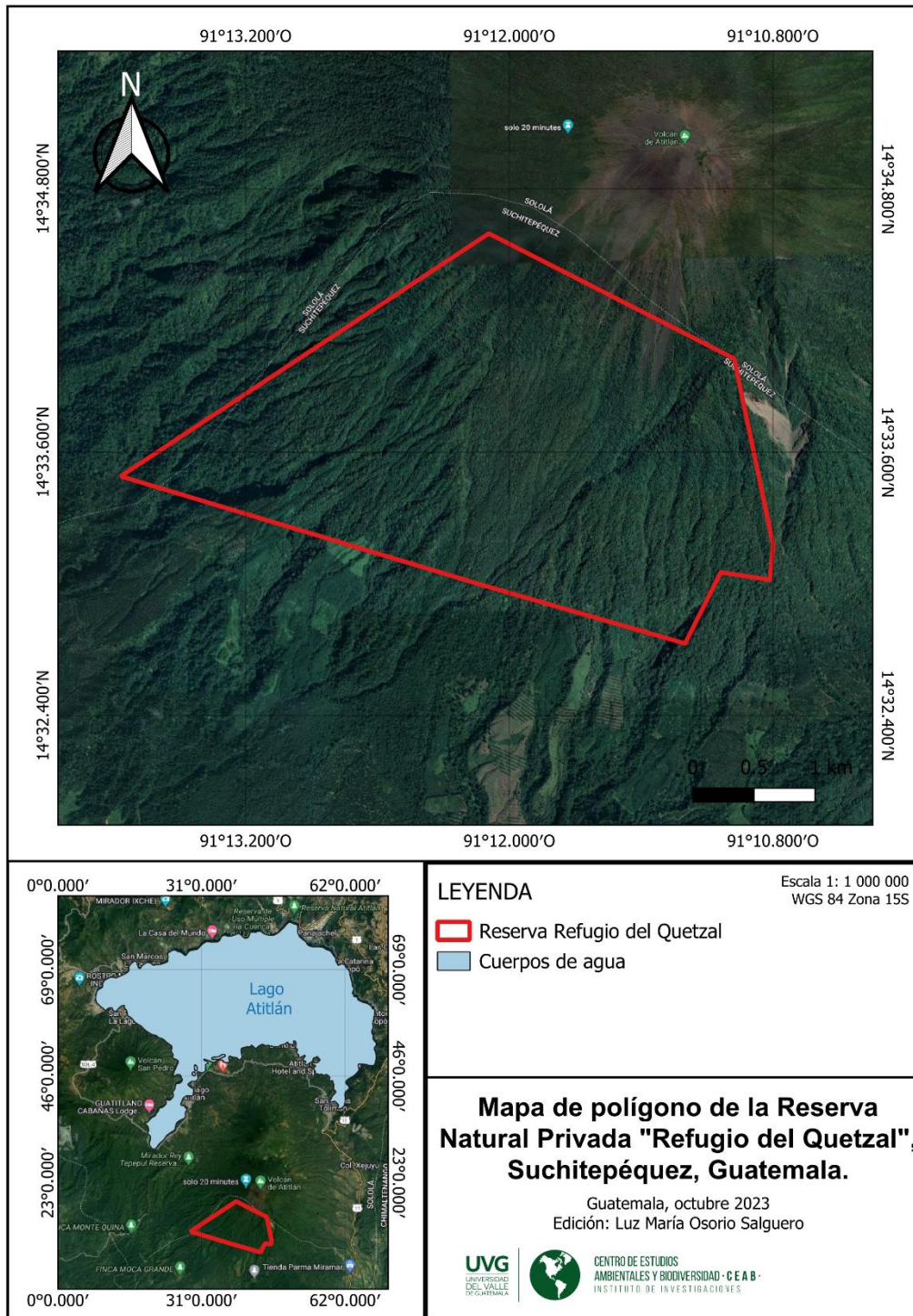


Figura 9. Mapa de polígono de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal, Suchitepéquez, Guatemala.

VIII. RESULTADOS

8.1 Análisis del almacenamiento de carbono Reserva Refugio del Quetzal

Se determinó que la cantidad de carbono almacenada para la reserva fue de un total de 119,904 tC/ha para el año 2016. El carbono se clasificó según zona de vida y estrato, donde el Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT) almacenó 70,778 tC/ha. Seguido por el Bosque Muy Húmedo Montano Tropical (bh-PMT) fijó 1,085 tC/ha y Bosque Muy Húmedo Pre montano Tropical (bhm-PMT) 48,041 tC/ha. No se cuenta con Bosque Húmedo Tropical (bh-T) para este año, por lo que su valor es de 0 tC/ha (**Cuadro 2**).

El estrato de carbono con mayor almacenamiento fue el II (**Cuadro 3**) siendo el Bosque Montano Bajo Tropical (bh-MBT) la zona con más carbono con un valor de 61,255 tC/ha. Asimismo, para el estrato II el Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT) fijó 0 tC/ha y el Bosque Muy Húmedo Pre montano Tropical (bhm-PMT) 3,729 tC/ha. No se cuenta con Bosque Húmedo Tropical (bh-T) para este año, por lo que su valor es de 0 tC/ha

Cuadro 2. Toneladas de carbono por hectárea (tC/ha.) clasificado por estrato y por zona de vida identificada de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal” año 2016.

Zona de Vida	Estrato de Carbono			
	II	III	IV	Total
Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT)	61,255	9,461	63	70,778
Bosque muy Húmedo Montano Tropical (bhm-MT)	0	1,085	0	1,085
Bosque muy Húmedo Pre montano Tropical (bhm-PMT)	3,729	7,015	23,751	48,041
Total	64,984	17,561	23,813	119,904

Similar al análisis anterior, el Cuadro 3 denota que la mayor cantidad equivalente de dióxido de carbono (CO_2e) se encuentra almacenada en el estrato II para la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT). Seguido por el estrato IV, donde la zona de vida con más almacenamiento fue Bosque Muy Húmedo Pre montano Tropical (bhm-PMT).

Cuadro 3. Cantidad de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO_2e) por estrato de carbono y zona de vida identificada de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”.

Zona de Vida	Estrato de Carbono			
	II	III	IV	Total
Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT)	224,602	34,689	231	259,517
Bosque Muy Húmedo Montano Tropical (bmh-MT)	-	3,980	-	3,980
Bosque Muy Húmedo Pre montano Tropical (bmh-PMT)	13,671	25,721	87,085	126,477
Total	238,273	64,390	87,316	389,974

8.2 Análisis económico del almacenamiento de carbono Reserva Refugio del Quetzal

Se estableció que el valor monetario total de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal” en términos de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO_2e) para el 2016 fue de Q 15,267,687.97. Según la clasificación de zonas de vida, el Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT) equivale a Q 10,160,263.76, el Bosque Muy Húmedo Montano Tropical (bh-PMT) a Q 155,803.99 y el Bosque Muy Húmedo Pre montano Tropical (bmh-PMT) a Q 4,951,620.22. No se cuenta con Bosque Húmedo Tropical (bh-T) para este año, por lo que su valor es de Q 0.00.

Además, se calculó el valor monetario de la reserva en dólares estadounidenses (USD), siendo un total de \$ 1,949,896.29.

Cuadro 4. Valor monetario en Quetzales (Q) del dióxido de carbono equivalente almacenado (CO_2e) por zona de vida identificada de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”.

Zona de vida	Estrato de Carbono			
	II	III	IV	Total
Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT)	8,793,174.55	1,358,056.13	9,033.09	10,160,263.76
Bosque muy Húmedo Montano Tropical (bmh-MT)	0.00	155,803.99	0.00	155,803.99
Bosque muy Húmedo Pre montano Tropical (bmh-PMT)	535,231.49	1,006,995.62	3,409,393.11	4,951,620.22
Total	Q 9,328,406.04	Q 2,520,855.74	Q 3,418,426.19	Q 15,267,687.97

Cuadro 5. Valor monetario en dólares estadounidenses (\$) del dióxido de carbono equivalente almacenado (CO_2e) por zona de vida identificada de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”.

Zona de vida	Estrato de Carbono			
	II	III	IV	Total
Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical (bh-MBT)	1,123,010.80	173,442.67	1,153.65	1,297,607.12
Bosque muy Húmedo Montano Tropical (bmh-MT)	-	19,898.34	-	19,898.33
Bosque muy Húmedo Pre montano Tropical (bmh-PMT)	68,356.51	128,607.36	435,426.96	632,390.83
Total	\$ 1,191,367.31	\$ 321,948.37	\$ 436,580.61	\$ 1,949,896.29

8.3 Cambios de almacenamiento de carbono Reserva Refugio del Quetzal

Las fluctuaciones en la captura de carbono de la Reserva Privada "Refugio del Quetzal" pueden atribuirse a diversos factores, tanto naturales como antropogénicos. Entre los principales factores destacan el cambio climático, que incide en la productividad y salud de los ecosistemas forestales, y la deforestación junto con la degradación del bosque, que disminuyen la capacidad de la reserva para capturar carbono al afectar la cobertura vegetal. Además, el manejo forestal, los ciclos de crecimiento y madurez, así como las prácticas agrícolas circundantes, también influyen en estas fluctuaciones. Es crucial realizar un monitoreo continuo y análisis detallado para comprender la interacción de estos factores y buscar estrategias de gestión que mantengan y mejoren la capacidad de la reserva para capturar carbono.

La comprensión de estos factores es esencial para garantizar la conservación efectiva de la reserva y para mitigar los impactos del cambio climático en los ecosistemas forestales. Un enfoque integral que aborde tanto los aspectos naturales como los antropogénicos es necesario para desarrollar estrategias de manejo sostenible que promuevan la salud y la resiliencia de la Reserva Privada "Refugio del Quetzal" y su capacidad para actuar como sumidero de carbono.

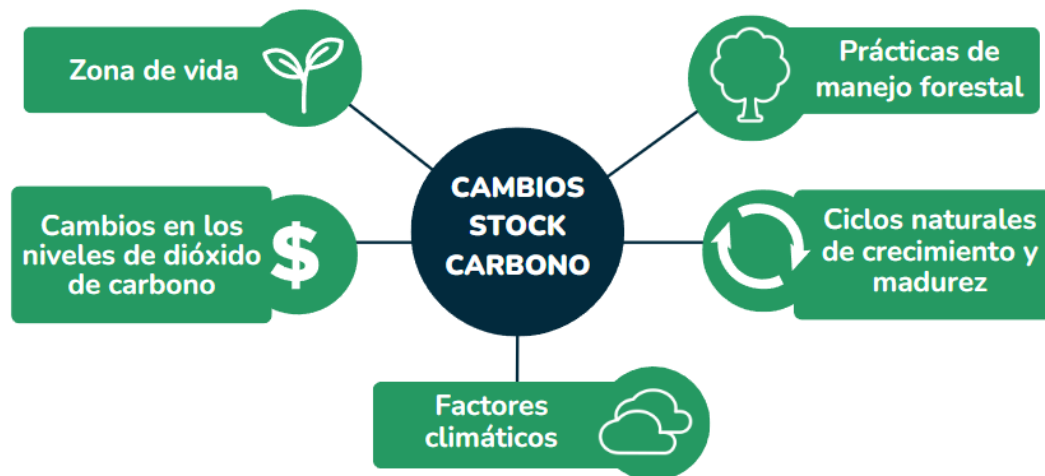


Figura 10. Factores que influyen en las fluctuaciones de captura de carbono de la Reserva Privada "Refugio del Quetzal"

8.4 Mapas de zonas de vida para la reserva años 2016, 2050 y 2080

Se observa un cambio de extensión de la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical, siendo que esta se desplaza hacia una elevación mayor dentro de la reserva para el 2050 (**Figura 11**) tomando como base el mapa de 2016 (**Figura 10**). Pasando el Bosque Muy Húmedo Montano Tropical a ser la zona de vida de mayor extensión para 2050. Asimismo, el Bosque Muy Húmedo Premontano Tropical se mantiene en ambos periodos de tiempo.

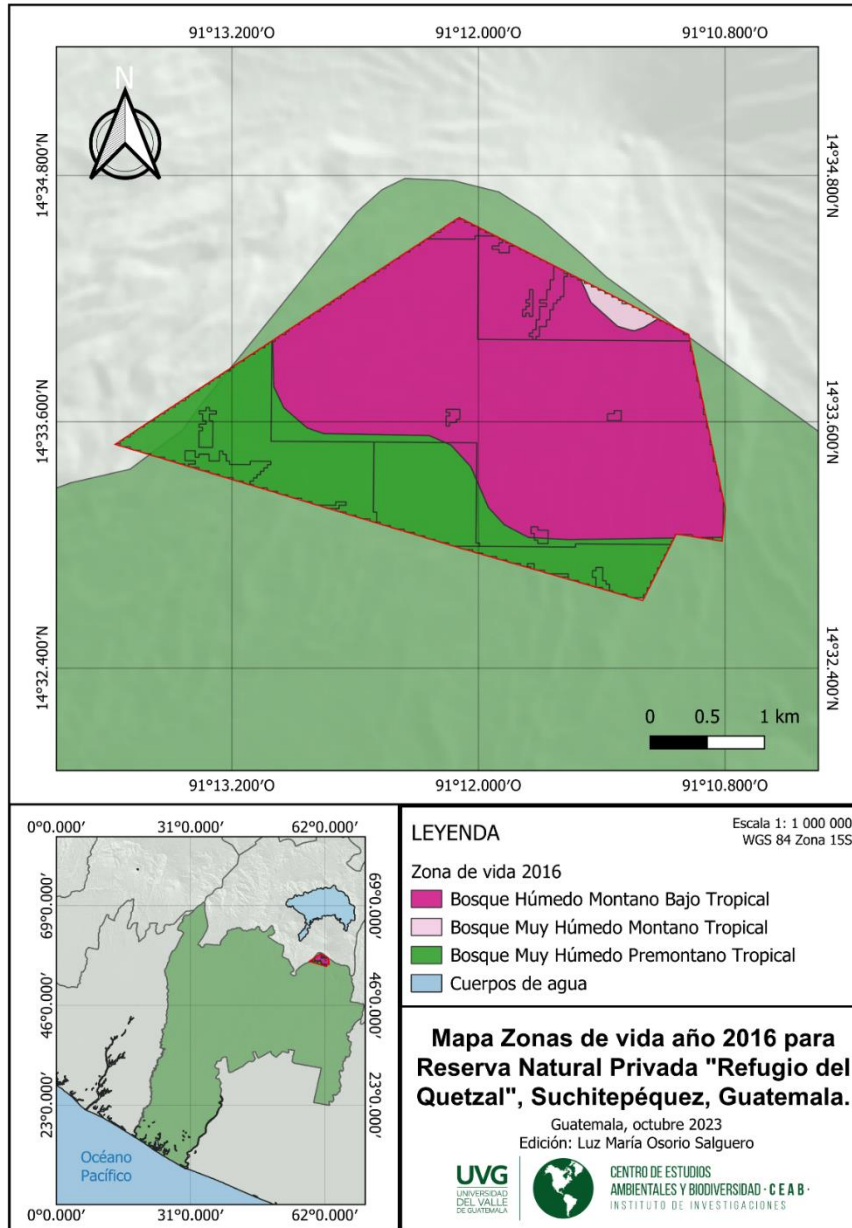


Figura 11. Mapa de zonas de vida año 2016 para la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.

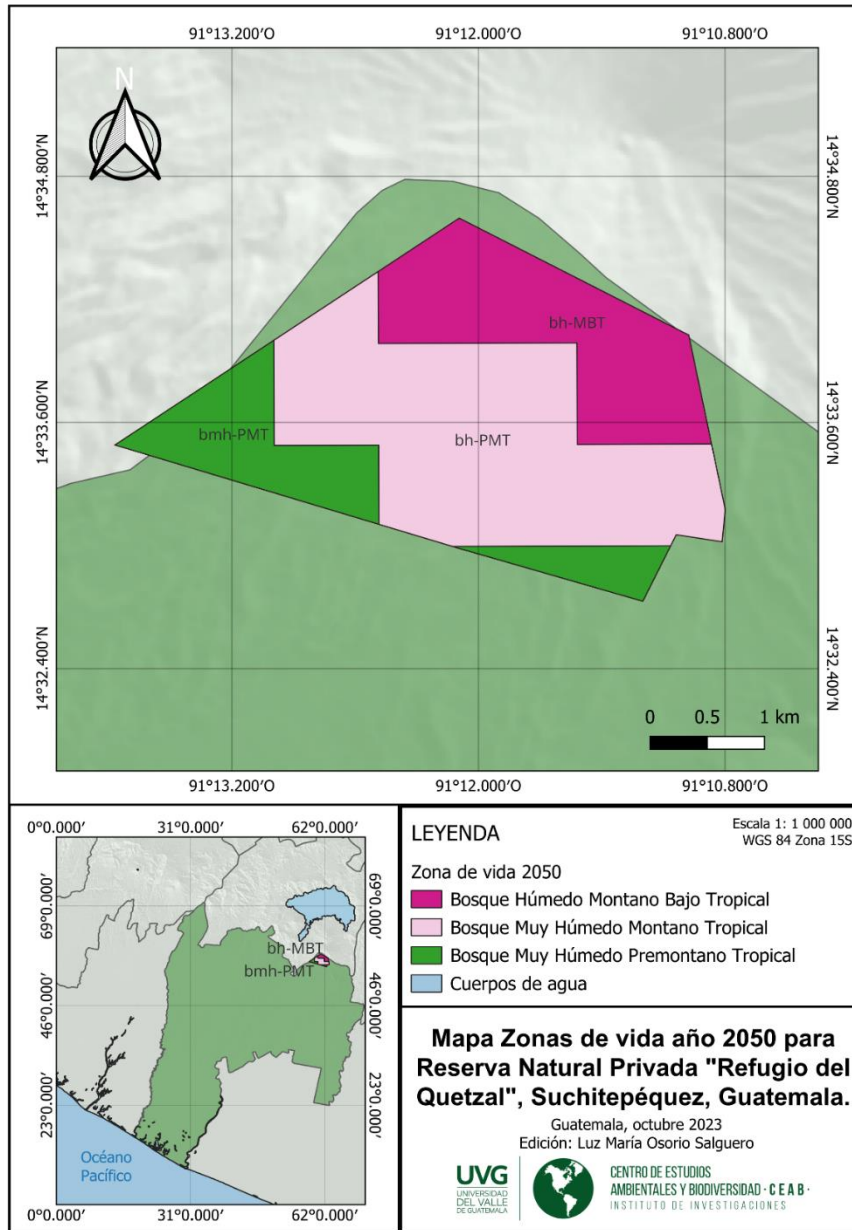


Figura 12. Mapa de zonas de vida año 2050 para la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.

El mapa del año 2080 de zonas de vida es el que más representa cambios con respecto a la línea base del 2016. Se mantiene una proporción de Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical en la parte más elevada de la reserva similar al 2050 (**Figura 11**), siendo ahora el Bosque Muy Húmedo Montano Tropical la zona de vida con mayor extensión debido a la transición posible de Bosque Muy Húmedo Pre Montano a este mismo. Cabe resaltar que para este año se tiene prevista la aparición de Bosque Húmedo Tropical para una pequeña área en una de las partes más bajas en elevación de la reserva (**Figura 12**).

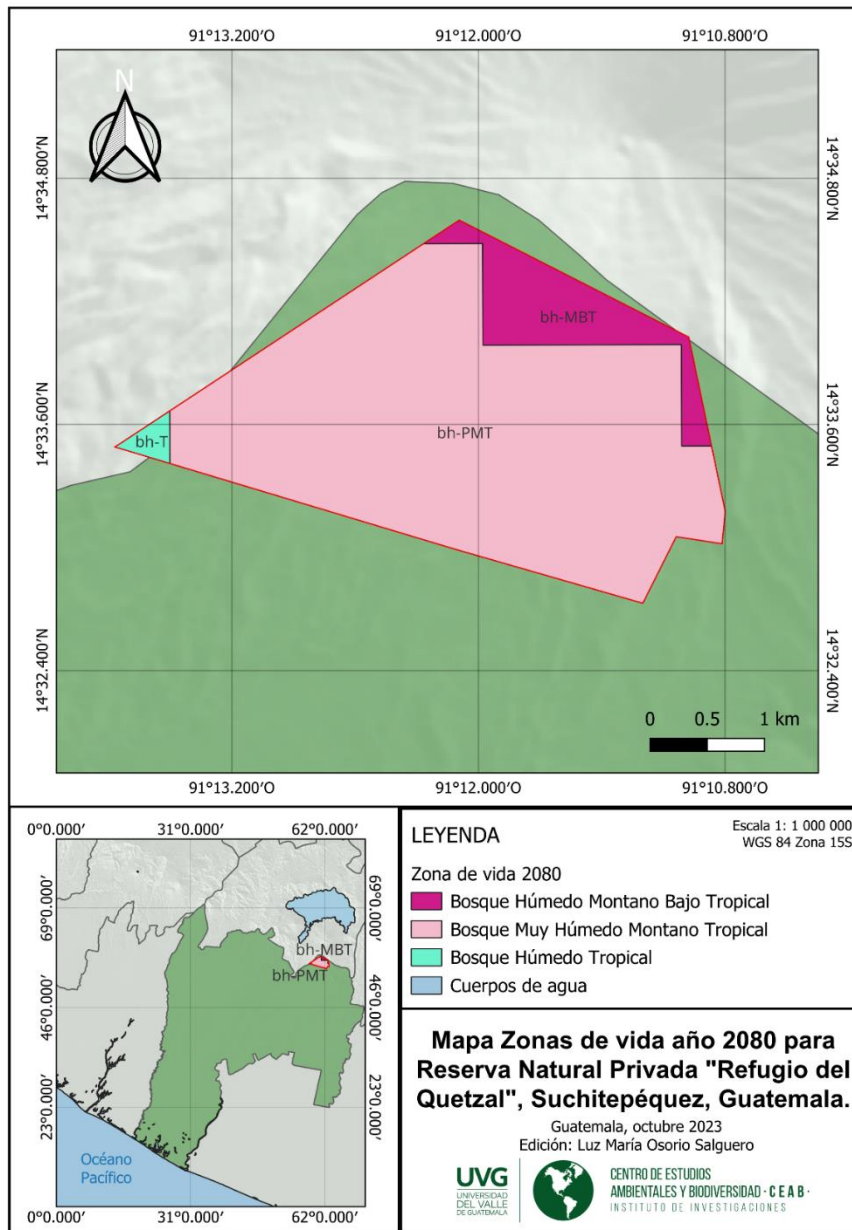


Figura 13. Mapa de zonas de vida año 2080 para la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.

8.5 Mapas de cambio de cobertura forestal futuro TerrSet años 2050 y 2080

Se observó una disminución en la cantidad de píxeles que representan la cobertura forestal al modificar la probabilidad de pérdida de bosque al 20% para el año 2050. La reducción de la cobertura forestal dentro del modelo TerrSet se tiene en cuenta considerando el raster de proximidad a caminos. Sin embargo, la reserva se encuentra alejada de estos caminos, por lo que el resultado indica que, a pesar de la posibilidad de disminución, esta reducción no se refleja de manera significativa (Figura 13). Esto también se debe al manejo sostenible del área, una acción que contribuye a preservar el bosque nuboso al eliminar su mayor amenaza, la deforestación.

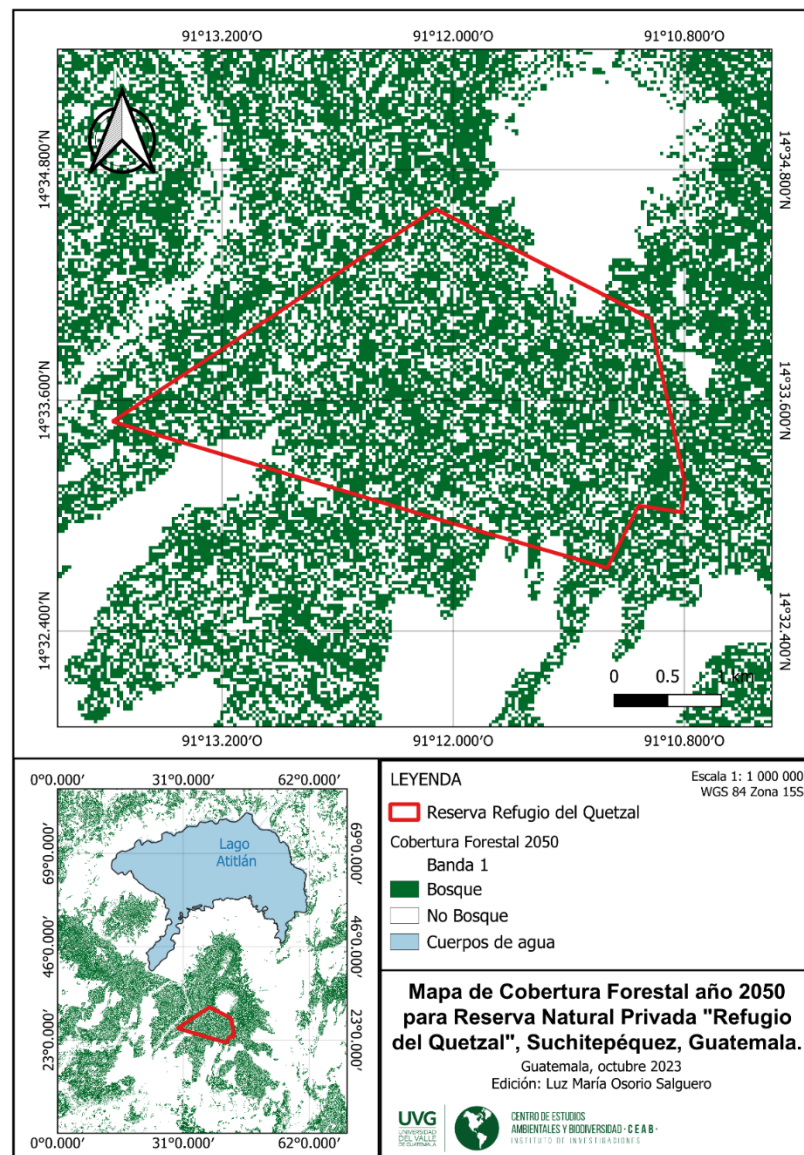


Figura 14. Mapa de Cobertura Forestal año 2050 probabilidad de pérdida de bosque 20% TerrSet 2020 para Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.

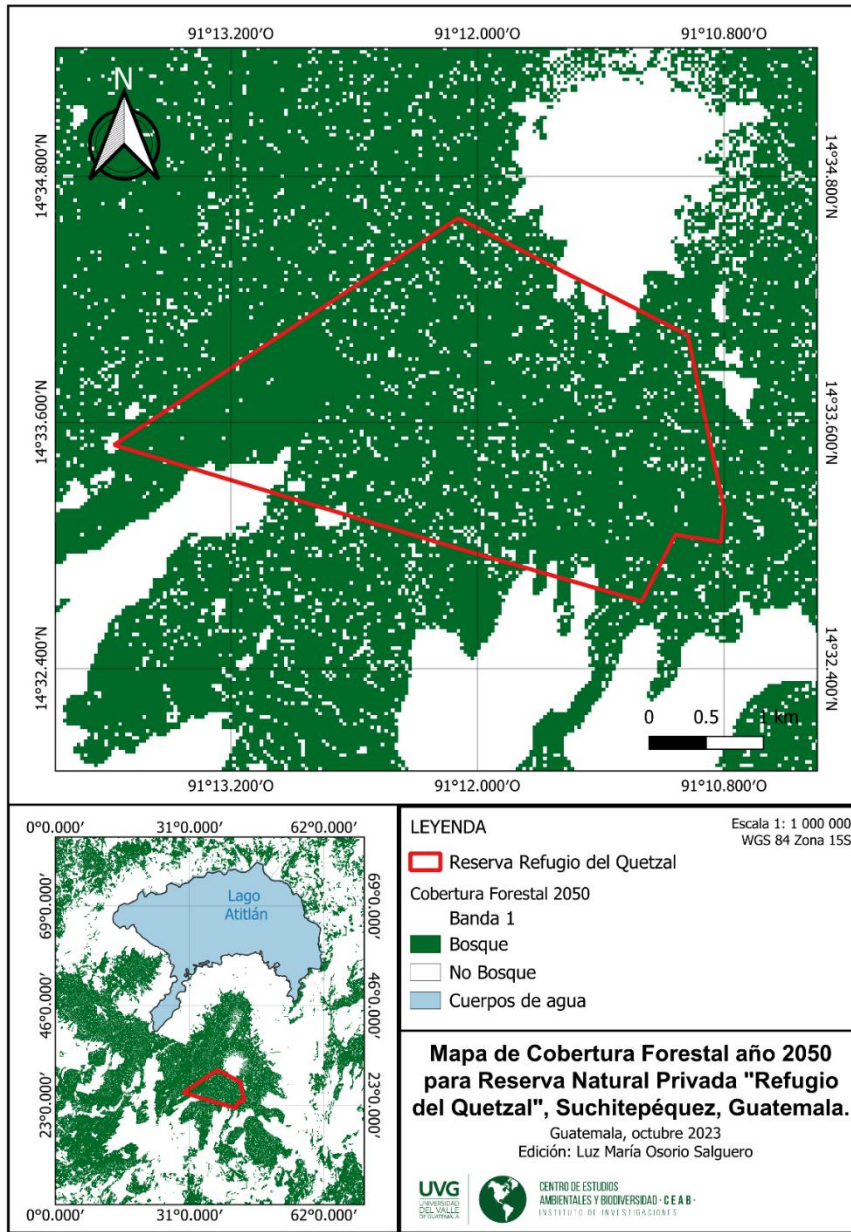


Figura 15. Mapa de Cobertura Forestal año 2050 probabilidad de pérdida de bosque 10% TerrSet 2020 para Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.

Similar al modelaje de cobertura forestal 2050, para el 2080 también se apreció una disminución en la cantidad de píxeles que representan al modificar la probabilidad al 10% y 20%. A pesar de que la reducción de la cobertura es aparente, la misma no es significativa ni relevante (Figura 16) debido a la gestión sostenible de la reserva.

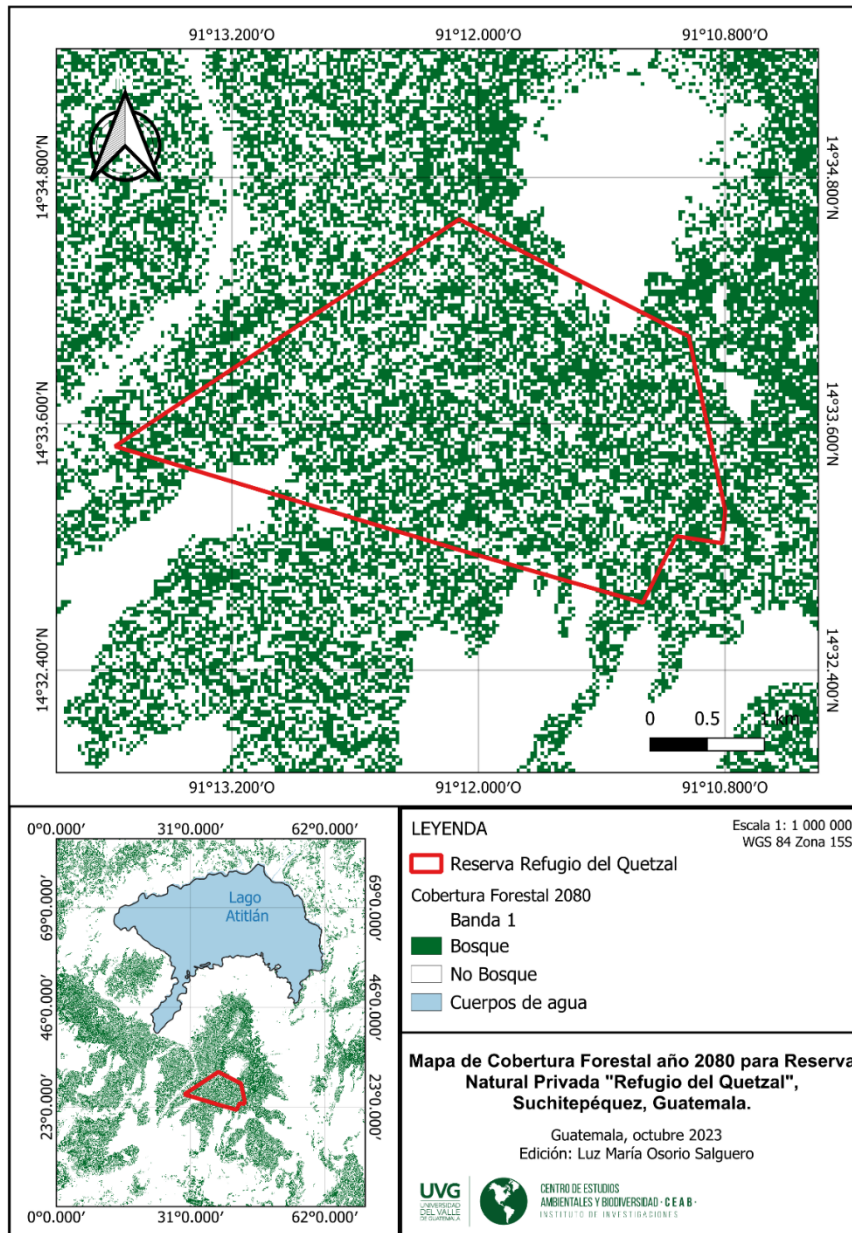


Figura 16. Mapa de Cobertura Forestal año 2080 probabilidad de pérdida de bosque 20% TerrSet 2020 para Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.

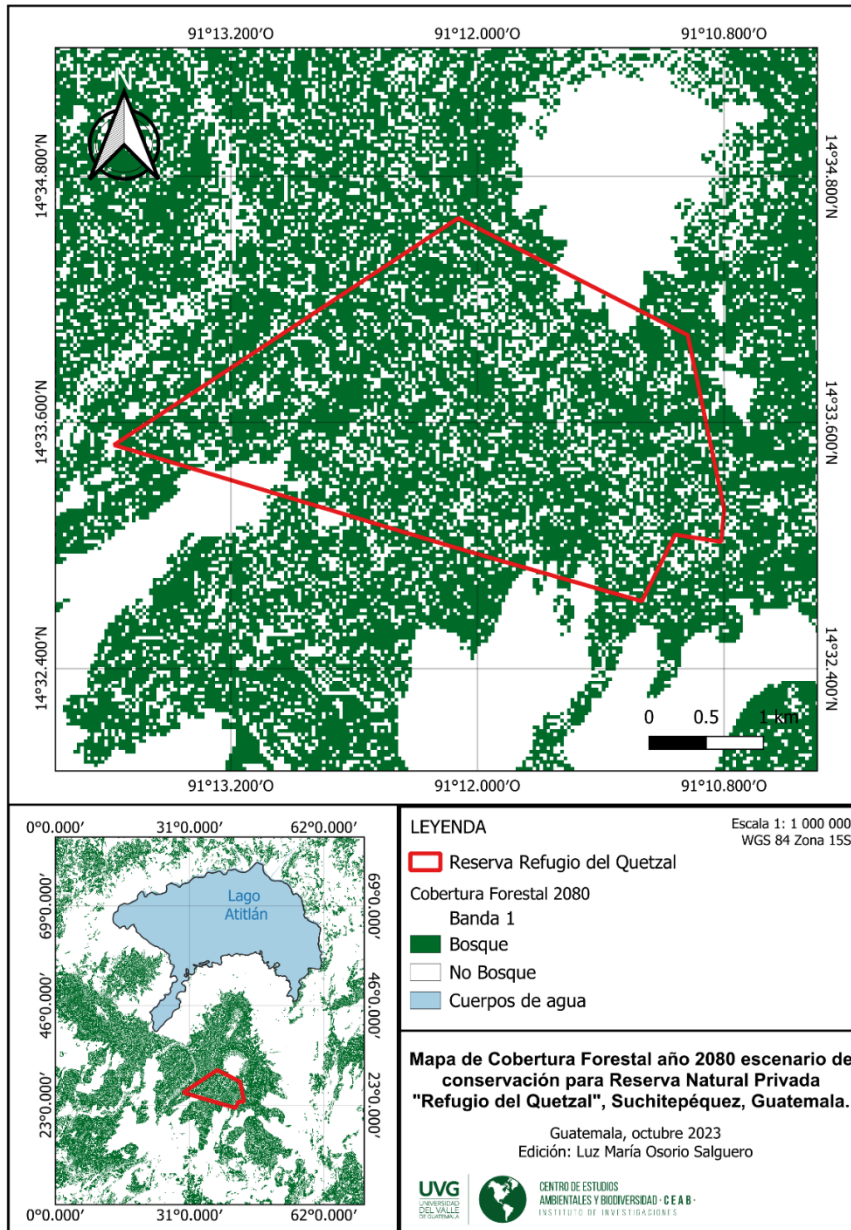


Figura 17. Mapa de Cobertura Forestal año 2080 probabilidad de pérdida de bosque 10% TerrSet 2020 para Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal”, Suchitepéquez, Guatemala.

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

9.1 Cuantificación del almacenamiento de carbono mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la cuantificación del almacenamiento de carbono se ha consolidado como una herramienta fundamental en la gestión ambiental y la toma de decisiones. En el caso de la Reserva Natural Privada "Refugio del Quetzal", las herramientas y mapas disponibles en QGIS 3.32.3 demostraron ser recursos valiosos para la medición del carbono, proporcionando resultados significativos. Se registró un total de 119,904 tC/ha para el año 2016.

Es importante destacar que estas herramientas SIG realizaron los cálculos utilizando como referencia los datos de estratos de carbono disponibles en la reserva y las zonas de vida modeladas para los años seleccionados. Además, no se pudo utilizar el mapa generado a través del software TerrSet 2020 para el modelamiento de la cobertura forestal, ya que, aunque mostró una disminución en la cantidad de píxeles que representan la cobertura forestal, esta reducción no se refleja de manera significativa en los modelos. Esto se debe a los parámetros y las iteraciones que se tuvieron en cuenta mediante el algoritmo, en consonancia con la gestión sostenible de la reserva. Asimismo, la ubicación y topografía del área permiten que el carbono se mantenga a lo largo de los años en sus distintas zonas de vida. Siendo su mayor amenaza la deforestación, la cual no es eminente debido al estado de conservación que mantiene por esfuerzos de la universidad.

A pesar de este desafío, el uso de zonas de vida resultó ser una herramienta valiosa para estimar y modelar el carbono almacenado en la reserva. Esto se debe a que diferentes tipos de vegetación y ecosistemas tienen tasas variables de captura y almacenamiento de carbono, y las especies predominantes pueden proporcionar una estimación general de la cantidad de carbono en el área. Por ejemplo, en el caso de la zona de vida "Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical" (bh-MBT) en Guatemala, caracterizada por la presencia de especies vegetales como *Engelhardtia* sp., *Podocarpus oleifolius*, *Oreopanax xalapensis*, *Magnolia guatemalensis*, *Alfaroa costaricensis*, *Pinus hartwegii* y *Pinus maximinoi*, se estima que este tipo de bosque puede almacenar en promedio entre 200 y 400 toneladas de carbono por hectárea (IARNA, 2018; Mapstone, 2017).

Sin embargo, es importante destacar que estas cifras pueden variar significativamente de un bosque a otro. Algunos bosques nubosos con condiciones particulares, como alta pluviosidad y temperaturas moderadas, tienen el potencial de secuestrar aún más carbono. Esto es evidente en el caso del Refugio del Quetzal, situado en las laderas del volcán Atitlán y caracterizado por su frecuente precipitación, que alcanza aproximadamente 7,000 milímetros al año (Monzón y Dix, 2018). Por lo tanto, es razonable aceptar los resultados proporcionados por los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que indican que este tipo de bosque pudo almacenar 70,778 tC/ha durante 2016 (ver Cuadro 2).

Otra zona de vida que se identificó en la reserva, en conjunto con los estratos de carbono estimados por Gómez (2018), es el Bosque húmedo premontano tropical (bh-PMT). Este registra

precipitaciones pluviales promedio anuales de 1,731 mm, y lo componen especies como *Acacia pennatula*, *Bauhinia divaricata*, *Bursera bipinnata*, *Ceiba aesculifolia*, *Dendropanax arboreus*, *Oreopanax obtusifolius*, *Pinus caribaea* y *Pinus oocarpa* (INAB, 2001). A pesar de la aparente escasez de precipitación pluvial, esta zona se clasifica como rica en agua, dado que presenta una relación promedio de 0.72 entre la evapotranspiración potencial y la precipitación pluvial. Esto significa que, por cada milímetro de lluvia, se pierden 0.72 mm debido a la evapotranspiración (IARNA, 2018). Además, dada su composición de especies arbóreas y niveles de pluviosidad, es imperativo considerar su alta capacidad para el almacenamiento de carbono. Por lo tanto, la transición observada en la reserva, de Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical en 2016 hasta el Bosque Húmedo Premontano Tropical en 2050, señala un cambio mínimo en el stock de carbono. En consecuencia, resulta razonable respaldar los resultados proporcionados por los Sistemas de Información Geográfica (ver Cuadro 2).

Asimismo, se observa la presencia de la zona Bosque Muy Húmedo Montano Tropical (bmh-PMT) dentro de la reserva. En este tipo de zona, las precipitaciones pluviales anuales alcanzan los 3,380 milímetros, y se destaca la presencia de especies vegetales como *Agave oppascidens*, *Inga leptaloba*, *Juniperus comitana*, *Liquidambar styraciflua*, *Pinus caribaea*, *Pinus maximinoi*, *Pinus oocarpa*, *Pinus tecunumanii*, *Podocarpus guatemalensis*, *Quercus corrugata* y *Quercus peduncularis* (INAB, 2001). A pesar de su relativamente alta precipitación pluvial, esta zona posee una mayor abundancia de especies de menor biomasa en comparación con el Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical. Por lo tanto, es razonable suponer que la capacidad de captura de carbono disminuye en la reserva, que posiblemente evolucionará hacia este tipo de bosque para el año 2050. Esta tendencia se refleja en el almacenamiento de 70,778 tC/ha en 2016 (Cuadro 2).

Por último, la presencia de la zona de vida Bosque Húmedo Tropical (bh-T) en la reserva para el año 2080 indica un posible cambio drástico en las condiciones de temperatura regional. Esta zona se encuentra a una altitud promedio de 182 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), con su punto más bajo en 0 m.s.n.m. y el más alto en 1,139 m.s.n.m. Además, se caracteriza por tener una temperatura promedio anual que oscila entre 24 y 28.1 °C con una precipitación anual de 2,199 mm, conteniendo especies de clima cálido como *Annona glabra*, *Bauhinia divaricata*, *Ceiba aesculifolia*, *Hampea trilobata*, *Passiflora mayarum*, *Tabebuia rosea*, *Trichilia minutiflora* y *Zamia splendens* (IARNA, 2018).

Es coherente anticipar un aumento en la temperatura para la reserva, dado que se ubica a altitudes que varían entre 1,179 y 2,574 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), y sus registros de temperatura actuales muestran valores promedio anuales comprendidos entre 9.9 y 18 °C (Monzón y Dix, 2018). Este cambio de zona de vida, de Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical a Bosque Húmedo Tropical, sugiere una transformación significativa en el entorno ecológico de la reserva. Debido a su clima cálido y mayor precipitación, es razonable suponer una menor captura de carbono a medida que la reserva se transforma en este tipo de bosque. Esta suposición podría validarse con los resultados proyectados por los Sistemas de Información Geográfica (Cuadro 3).

A pesar de que se observa una aparente correlación entre el tipo de zona de vida y el almacenamiento de carbono utilizando SIG, es esencial tener presente que esta aproximación simplifica el proceso. Es decir que podría existir una sobrestimación o subestimación de la cantidad

de carbono presente en la reserva. El volumen de carbono almacenado en un ecosistema específico también está influenciado por diversos factores, tales como la edad de los árboles, la densidad forestal, las condiciones climáticas, la historia de perturbaciones y las prácticas de manejo de la tierra. En consecuencia, la utilización de modelos más avanzados que tomen en consideración estos factores podría proporcionar estimaciones más precisas del carbono almacenado en la reserva (Rodríguez-Veiga, *et al.*, 2017).

Además, esta estimación subraya la importancia de llevar a cabo levantamientos de datos *in situ*, que incluyen la identificación de especies forestales y mediciones como el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y el uso de ecuaciones alométricas para evaluar los árboles. Estas prácticas son fundamentales para proporcionar información detallada y precisa sobre la salud y la dinámica de los ecosistemas forestales. Los datos recopilados *in situ* son esenciales para validar y calibrar los modelos y estimaciones obtenidos mediante herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las imágenes satelitales (Asner, *et al.*, 2010).

Al medir directamente en el campo, se pueden considerar una amplia variedad de variables, como la diversidad de especies, la edad de los árboles, la calidad de la madera y los patrones de crecimiento, todas las cuales son cruciales para obtener una comprensión completa de la ecología forestal (Goetz, *et al.*, 2009). En resumen, la combinación de datos *in situ* con herramientas tecnológicas y modelos podría contribuir a una evaluación más precisa y completa del carbono almacenado en la reserva, lo que resulta fundamental para la gestión sostenible de los recursos naturales y la mitigación del cambio climático.

9.2 Valorización económica de almacenamiento de carbono mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La valorización económica del almacenamiento de carbono a través de SIG se ha revelado como una herramienta efectiva para evaluar el valor financiero de la reserva. Esta metodología brinda la capacidad de integrar datos geoespaciales con información cuantitativa, permitiendo una comprensión más profunda de la distribución del carbono en el área (Wang, *et al.*, 2021). Según los cálculos, el valor económico de la reserva en términos equivalentes de dióxido de carbono (CO_2e) para el año 2016 fue de Q Q15,267,687.97. El valor de referencia utilizado para asignar un valor económico al carbono capturado fue de USD 5 por tonelada de CO_2e , basado en el precio promedio de la tonelada de CO_2 equivalente en el mercado internacional en los últimos años (Mena, 2021).

No se observa un cambio significativo en el valor monetario de CO_2e para los años 2050 y 2080, ya que los modelos obtenidos no indican una pérdida sustancial de carbono en comparación con años anteriores (Eastman, 2016). Esto sugiere una estabilidad en el almacenamiento de carbono en la reserva a lo largo del tiempo, lo que es un indicio positivo en términos de conservación y sostenibilidad. Sin embargo, es importante continuar monitoreando y evaluando la dinámica del carbono en la reserva para garantizar que se mantenga este equilibrio a lo largo del tiempo y que se sigan implementando medidas efectivas de gestión ambiental.

9.3 Impacto del Valor Económico del Carbono en la Conservación y Manejo de la Reserva Natural Privada "Refugio del Quetzal"

El valor económico del servicio de fijación de carbono ejerce un impacto sustancial en las decisiones de manejo de los recursos naturales en la Reserva Natural Privada "Refugio del Quetzal". El asignar un valor monetario al carbono almacenado en los ecosistemas forestales de la reserva crea un fuerte incentivo para la conservación de estos recursos. Esto significa que las áreas ricas en carbono identificadas se vuelven valiosas desde una perspectiva económica, promoviendo la adopción de prácticas de manejo sostenible y desalentando la deforestación y la degradación de los bosques (Asner, *et al.*, 2010).

Además, al ser una reserva privada bajo manejo sostenible, el valor económico del carbono almacenado en el área podría facilitar la participación en mercados de carbono, donde las entidades propietarias de la reserva, como la Universidad del Valle de Guatemala y el Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad, pueden vender créditos de carbono generados a través de proyectos de mitigación del cambio climático.

X. CONCLUSIONES

1. El valor monetario de la Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal” en términos equivalentes de dióxido de carbono (CO_2e) para el 2016 es de Q 15,267,687.97, utilizando herramientas SIG.
2. La Reserva Natural Privada “Refugio del Quetzal” representa Q 15,267,687.97 en equivalencia de dióxido de carbono (CO_2e) para los años 2050 y 2080.
3. Es posible que se produzca un cambio en el almacenamiento de carbono debido a la transformación del tipo de bosque. Ya que los modelos denotaron un aumento de almacenamiento de carbono en 4,87% para la zona de vida Bosque Muy Húmedo Montano Tropical (bh-PMT) dentro de la Reserva proyectado para los años 2050 y 2080.
4. Para el año 2080 la Reserva contará con la presencia de Bosque Tropical Húmedo (bh – T), siendo esta un nuevo tipo de zona de vida no reportada en años anteriores para el volcán Atitlán, Además, se prevé que el Bosque Muy Húmedo Pre montano Tropical (bmh-PMT) transicionará a Bosque Muy Húmedo Montano Tropical (bh-PMT).
5. A pesar de que se observa una pérdida de cobertura forestal para los años 2050 y 2080 en la Reserva “Refugio del Quetzal”, esta no es significativa para los modelos, ya que la reserva se encuentra bajo protección y un manejo sostenible.

XI. RECOMENDACIONES

1. Replicar este estudio en otras áreas donde se cuenten con datos de carbono forestal *in situ*, con el fin de comparar los datos obtenidos *ex situ* mediante la metodología de Sistema de Información Geográfica (SIG). Esto permitirá una evaluación más amplia y precisa de la captura de carbono en distintos entornos, respaldando así la validez y utilidad de este enfoque para la valoración de servicios ecosistémicos en diferentes regiones geográficas.
2. Seguir monitoreando y actualizando los datos de almacenamiento de carbono de la Reserva con la finalidad de validar las predicciones a lo largo del tiempo y ajustar las estrategias de manejo en consecuencia. La recopilación continua de datos precisos permitirá demostrar el impacto positivo de las acciones de manejo sostenible de la Reserva, lo que puede ser crucial para obtener apoyo y financiamiento adicional para la protección del área.
3. Reforzar la importancia de las prácticas de manejo sostenible en la Reserva y promover la adopción de enfoques de conservación que equilibren la conservación del carbono con otras necesidades y actividades humanas en la zona. Esto podría ayudar a fortalecer la colaboración entre todas las partes interesadas y a crear un entorno donde la Reserva sea vista como un recurso compartido que debe protegerse y gestionarse de manera sostenible.
4. Buscar oportunidades para diversificar las fuentes de financiamiento de la Reserva. Esto podría incluir programas de compensación de carbono o iniciativas de conservación respaldadas por donantes. Al diversificar las fuentes de financiamiento, se reduce la dependencia de un solo recurso financiero y garantizamos la sostenibilidad a largo plazo. Al mismo tiempo, la colaboración con donantes interesados en la conservación podría brindar la oportunidad de acceder a recursos adicionales y apoyo técnico que fortalecerían los esfuerzos de preservación y desarrollo sostenible en la zona.

XII. LITERATURA CITADA

- Abebe, G., Getachew, D., y Ewunetu, A. (2022). Analizando los cambios en el uso y cobertura del suelo y su dinámica utilizando teledetección y SIG en el distrito de Gubalafito, al noreste de Etiopía. *SN Applied Sciences*, 4(1), 30
- Asner, G. P., Powell, G. V. N., Mascaro, J., Knapp, D. E., Clark, J. K., Jacobson, J., ... Hughes, R. F. (2010). Almacenamiento y emisiones de carbono en bosques de alta resolución en la Amazonía. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(38), 16738–16742. doi:10.1073/pnas.1004875107
- Balasubramanian, M. (2019). Valor económico de la regulación de los servicios ecosistémicos: una revisión exhaustiva a escala mundial. *Vigilancia y evaluación medioambientales*, 191(10). doi:10.1007/s10661-019-7758-8
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2019). *Capital Natural en América Latina y el Caribe*. Recuperado de https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Capital_natural_en_Am%C3%A9rica_Latina_y_el_Caribe_es.pdf
- Blanco, G., & Gunther, M. (2019). De crisis ecológicas y transiciones: reflexiones sobre teoría social latinoamericana frente al cambio climático ambiental global. *Revista colombiana de Sociología*, 42(1), 19-40.
- Barrera, P. (2023). 17 datos interesantes de la Reserva Natural Privada El Refugio del Quetzal. Recuperado de <https://noticias.uvg.edu.gt/17-datos-interesantes-de-la-reserva-natural-privada-el-refugio-del-quetzal/>
- Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R. y Riahi, K. (2008). IPCC, 2007: *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*.
- Bolstad, P. y Manson, S. (2008). Fundamentos de SIG: Un primer texto sobre sistemas de información geográfica (Vol. 620). *White Bear Lake, MN: Eider Press*.
- Camacho, V., & Ruiz, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1(4).
- Calel, R. (2013). Mercados de carbono: una visión histórica. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 4(2), 107-119.
- Capitani, C., Van Soesbergen, A., Mukama, K., Malugu, I., Mbilinyi, B., Chamuya, N., . . . Marchant, R. (2019). Escenarios de cambio de uso y cobertura del suelo y sus múltiples impactos sobre el capital natural en Tanzania. *Conservación del medio ambiente*, 46(1), 17-24. doi:10.1017/S0376892918000255
- Carrera, J. L. (2019). ¿Qué tan vulnerables somos? Elementos para entender la vulnerabilidad de Guatemala. En E. J. Castellanos, A. Paiz-Estévez, J. Escribá, M. Rosales-Alconero, & A.

- Santizo (Eds.), Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala. *Editorial Universitaria UVG*.
- Carrera, J. L., Mosquera Salles, V., & Gándara, A. (2019). Diversidad biológica y ecosistemas terrestres. En E.J. Castellanos, A. Paiz-Estévez, J. Escribá, M. Rosales-Alconero, & A. Santizo (Eds.), Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala. *Editorial Universitaria UVG*
- CDB. (2016). *Texto completo del Convenio sobre la Diversidad Biológica*. Obtenido de www.cbd.int/convention/convention.shtml
- Centro de Ecología Aplicada. (2018). *Metodologías de Evaluación de Servicios*. Chile: Ministerio del Medio Ambiente.
- CEPAL, NDF, BID y MARN. (2018). *La economía del cambio climático en Guatemala - Documento Técnico*. Repositorio CEPAL. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/>
- Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP). (2021). *El Proyecto Guatecarbon de la Reserva de la Biosfera Maya da pasos firmes para mitigar los efectos del Cambio Climático*. Recuperado de <https://conap.gob.gt/el-proyecto-guatecarbon-de-la-reserva-de-la-biosfera-maya-da-pasos-firmes-para-mitigar-los-efectos-del-cambio-climatico/>
- CONAP. (2013). *Política Nacional de Diversidad Biológica (Acuerdo Gubernativo 220 -2011) Estrategia Nacional de*. Programas y Proyectos No. 03 (01-2013).
- CONAP et al. (2016). *VI informe nacional de cumplimiento a los acuerdos del Convenio sobre Diversidad Biológica*. Obtenido de <http://201.207.189.89/handle/11554/9198>
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... & Turner, R. K. (2014). Cambios en el valor global de los servicios ecosistémicos. *Cambio ambiental global*, 26, 152-158.
- CRED. (2019). *Desastres Naturales 2018*. . CRED, Brussels., https://emdat.be/sites/default/files/adsr_2018.pdf.
- De Groot, R., Brander, L., Van Der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., ... & Van Beukering, P. (2012). Estimaciones globales del valor de los ecosistemas y sus servicios en unidades monetarias. *Ecosystem Services*, 1(1), 50-61.
- Earthwise Aware. (2021). *Qué son los servicios ecosistémicos?* Obtenido de <https://www.earthwiseaware.org/what-are-ecosystem-services/>
- Eisermann, K., & Schulz, U. (2005). Aves de un bosque nuboso de alta altitud en Alta Verapaz, Guatemala. *Revista de Biología Tropical*, 53(3-4), 577-594.
- Eastman, J. R. (2016). *Manual TerrSet: Sistema de monitorio geoespacial y modelado*. Clark Labs. Recuperado de www.clarklabs.org

- Eastman, J. R. y He, J. (2020). Un procedimiento basado en regresión para la estimación de probabilidades de transición de Markov en la modelización de cambios en el uso del suelo. *Land*, 9(11), 407. MDPI AG. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3390/land9110407>.
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. (2003). Marco Conceptual de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Recuperado de <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.765.aspx.pdf>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., y Taylor, K. E.: Resumen del diseño experimental y la organización de la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6), *Desarrollo de Modelos Geocientíficos*, 9, 1937-1958, doi:10.5194/gmd-9-1937-2016, 2016.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2022). *Servicios Ecosistémicos*. Obtenido de <https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background>
- Fawzy, S., Osman, A., & Doran, J. (2020). Estrategias para la mitigación del cambio climático: una revisión. *Environ Chem Lett*, 18, 2069–2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2001). Tercer informe de evaluación. Cambio climático 2001: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas y resumen técnico. *Ginebra*. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC. (2013) Cambio climático 2013: bases físicas. Resumen para responsables de políticas, Resumen técnico y preguntas frecuentes. (T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, ... P. Midgley, Eds.). *Ginebra*. Recuperado de http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2018): Resumen para responsables de políticas. *En: Calentamiento global de 1,5 °C*, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC, 2021: Anexo II: Modelos [Gutiérrez, J. M., A.-M. Tréguier (eds.)]. En Cambio Climático 2021: Fundamentos de las Ciencias Físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (eds.)]. *Editorial de la Universidad de Cambridge, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE. UU.*, pp. 2087-2138, doi:10.1017/9781009157896.016.

- Grêt-Regamey, A. S., Grêt-Regamey, A., Sirén, E., Brunner, S., & Weibel, B. (2017). Revisión de herramientas de apoyo a la toma de decisiones para operacionalizar el concepto de servicios ecosistémicos. *Ecosystem Services*, 26, 306-315.
- Goetz, S.J., Baccini, A., Laporte, N.T. et al. (2009). Mapeo y monitoreo de existencias de carbono con observaciones satelitales: una comparación de métodos. *Balance y Gestión de Carbono*, 4(1), 2. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-4-2>.
- Hamilton, L., Bruijnzeel, L. y Scatena, F. (2010). Bosques Nubosos de Montaña Tropical: Ciencia para la Conservación y el Manejo. *Cambridge: Cambridge University Press*.
- Higuera, D., Martín-López, B. y Sánchez-Jabba, A. (2013). Preferencias sociales hacia los servicios ecosistémicos proporcionados por los bosques nubosos en el neotrópico: implicaciones para estrategias de conservación. *Cambio Ambiental Regional*, 13(4), 861-872.
- Holdridge, L. R. (1967). *Ecología de las zonas de vida. Ecología de las zonas de vida*, (ed. rev.), (rev. ed.).
- Hijmans, R. J., et al. (2005). Superficies climáticas interpoladas de muy alta resolución para áreas terrestres globales. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Instituto de Investigación en Ciencias Naturales y Tecnología (IARNA). (2018). Ecosistemas de Guatemala basado en el sistema de clasificación de zonas de vida. Guatemala.
- Instituto de Investigación en Ciencias Naturales y Tecnología (IARNA). (2019). Mapa de Cobertura Forestal República de Guatemala año 2016. Recuperado de <http://www.infoiarnea.org.gt/recursos-informativos/mapas/>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2019). *XII Censo nacional de población y VII de vivienda. Principales resultados*. <https://www.censopoblacion.gt/documentacion>
- Instituto Nacional de Bosques. (2001a). *Especies vegetales frecuentes en los ecosistemas de Guatemala*. Manuscrito no publicado. Guatemala.
- Instituto Nacional de Bosques (INAB). (2023). *Ecosistema Bosque Nubosos*. Recuperado de <https://sig.inab.gob.gt/portal/apps/webappviewer/index.html?id=fe80b004cfe34f9c9c407ccad325d172>
- Ji, C. J., Hu, Y. J., & Tang, B. J. (2018). Investigación sobre el mecanismo de precio en el mercado de carbono y factores influyentes: una revisión de la literatura. *Riesgos Naturales*, 92, 761-782.
- Lino, K. A., & Marmolejo Duarte, C. R. (2019). Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y bonos verdes como movilizadores financieros; Una oportunidad para las inversiones alineadas al clima en Latinoamérica?. In XIII CTV 2019 *Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: "Challenges and paradigms of the contemporary city"*: UPC, Barcelona, October 2-4, 2019. Centre de Política de Sol i Valoracions, CPSV/Universitat Politècnica de Catalunya, UPC.

- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. y Rhind, D. W. (2015). *Sistemas de Información Geográfica y Ciencia*. John Wiley & Sons.
- Los, S., Street-Perrott, F. y Loader, N. (2021). Detección de señales relacionadas con el cambio climático, el cambio de cobertura terrestre y los osciladores climáticos en los Bosques Nubosos de Montaña Tropical. *Teledetección del Medio Ambiente*, 260, 112431.
- Pérez, M., Fernández, C., & Sayer, J. (2007). Los servicios ambientales de los bosques. *Ecosistemas*, 16(3).
- Mapplecroft. (2014). Índice de vulnerabilidad al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe. Corporación Andina de Comercio.
- Mapstone, Elli. (2017). Secuestro de carbono en el bosque nuboso: Una evaluación comparativa del potencial de almacenamiento de carbono de biomasa sobre el suelo en la Reserva Río Guajalito. *Colección del Proyecto de Estudio Independiente (ISP)*. 2726.
- Medina, César E, Medina, Yasmy K, & Bocardo, Edwin F. (2020). Valoración económica del secuestro y almacenamiento de carbono en la puna seca del suroeste del Perú. *Bosque (Valdivia)*, 41(2), 165-172. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002020000200165>
- Mena, C. (2021). Metodología para la estimación del precio social del carbono en Chile y los países de América Latina y el Caribe (Documento de Proyectos LC/TS.2021/72). *Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*.
- MSPAS (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social). (2020). *Enfermedades transmitidas por vectores, años 2012 al 2019. Sistema de Información Gerencial de Salud*. <https://sigsa.mspas.gob.gt/datos-de-salud/morbilidad/enfermedades-transmitidas-por-vectores>
- Monzón, J. y Dix, M. (2018). Reserva Natural Privada Refugio del Quetzal Volcán Atitlán. [electrónico]. Guatemala, Guatemala: *Serviprensa S.A*. ISBN: 978-9929-8073-7-2.
- Nasi, R., Putz, F. E., Pacheco, P., Wunder, S. y Anta, S. (2011). Manejo forestal sostenible y carbono en América Latina tropical: el caso de REDD+. *Bosques*, 2(1), 200-217.
- Ninan, K. N. y Kontoleon, A. (2016). Valoración de los servicios y deservicios del ecosistema forestal: estudio de caso de un área protegida en India. *Servicios Ecosistémicos*, 20, 1-14. doi:10.1016/j.ecoser.2016.05.001
- Nutto, L., Watzlawick, L. F., Grammel, R. y Fenner, P. T. (2002). El mercado internacional de CO₂: El impacto de los bosques naturales y las plantaciones. En C. R. Sanquetta, L. F. Watzlawick y R. Balbinot (Eds.), *Los Bosques y el Carbono* (pp. 89-108). Curitiba: FUPEF/Imprensa da UFPR.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461–3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>, 2016.

- Pons, D., Castellanos, E., Conde, D., Brincker, J., Incer, D., López, A. (2018). Escenarios de aridez para Guatemala para los años 2030, 2050 y 2070 utilizando modelos de cambio climático. *Revista Yu'am* 2(4): 4-16 pp.
- PNACC, P. N. (2021). Adaptación y mitigación, estrategias complementarias. *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*, 246.
- Rivera Ramos, P. F., Bardales Espinoza, W. A., & Ochoa, W. (2019). Escenarios futuros de cambio climático para Guatemala. En Edwin J Castellanos, A. Paiz-Estévez, J. Escribá, M. Rosales-Alconero, & A. Santizo (Eds.), Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala. *Editorial Universitaria UVG*.
- Reséndiz, S. (2020). *Economía y los recursos naturales*. Obtenido de Universidad del Medio Ambiente: <https://umamexico.com/la-economia-y-los-recursos-naturales/>
- Robles Valle, G. R., *et al.* (2000). Evaluación de los productos forestales no madereros en América Central. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Costa Rica.
- Rodríguez-Veiga, P., Wheeler, J., Louis, V., Tansey, K., & Balzter, H. (2017). Cuantificación de carbono en biomasa forestal desde el espacio. *Informes Actuales de Silvicultura*, 3, 1-18.
- Sanquetta, C. R., Dalla Corte, A. P. y Benedet Maas, G. C. (2011). El papel de los bosques en el cambio climático. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, 19(1-2), 84-96.
- Serrano, M. (2019). Determinación de especies forestales relevantes para restauración con base en la importancia ecológica y cultural en el bosque nuboso de San Cristóbal Verapaz, Alta Verapaz, Guatemala. *Revista UVG*, URI: <http://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/123456789>.
- Secretaría de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (UNFCCC). (2004). Cuidar el clima: Guía de la convención sobre el cambio climático y el protocolo de Kyoto. Bonn, Alemania.
- Steffen, W. R., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, E., Fetzer, I. y Bennett, E. (2015). Límites planetarios: Guiando el desarrollo humano en un planeta en cambio. *Ciencia*, 347(6223), 125985.
- Naciones Unidas. (2017). Resolución adoptada por la Asamblea General el 6 de julio de 2017, Trabajo de la Comisión de Estadística relacionado con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. (A/RES/71/313).
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2018). Entendiendo REDD+ y el Diario de Aprendizaje de la UNFCCC *Edición 3*. Recuperado de https://www.un-redd.org/sites/default/files/2021-10/UN-REDD%20ACADEMY_2018_5reduced.pdf
- Velásquez, M. (2016). Análisis del Uso de Bonos de Carbono para el Pago por Servicios Ambientales en Guatemala. *Revista Auctoritas Prudentium*.

- Wang, L., Chen, C., Xie, F., Hu, Z., Zhang, Z., Chen, H. y Chu, Y. (2021). Estimación del valor de los servicios ecosistémicos regionales de un archipiélago utilizando tecnología de teledetección por satélite: Un estudio de caso del Archipiélago Zhoushan, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 105, 102616.
- Zhang, P., He, L., Fan, X., Huo, P., Liu, Y., Zhang, T. y Pan, Y. (2015). Evaluación del valor de los servicios ecosistémicos y análisis de factores de contribución del cambio en el uso del suelo en el Condado de Miyun, China. *Sostenibilidad*, 7(6), 7333-7356. MDPI AG.