



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS
ESPACIOTEMPORALES DEL NDVI Y SU RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA
EN LOS BOSQUES DE LAS CONCESIONES FORESTALES DE GUATEMALA**

Brandon René Sigüenza González

Asesorado por Msc. Ing. Edson Toniño Hernández

Guatemala, mayo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS
ESPACIOTEMPORALES DEL NDVI Y SU RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA
EN LOS BOSQUES DE LAS CONCESIONES FORESTALES DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BRANDON RENÉ SIGÜENZA GONZÁLEZ
ASESORADO POR MSC. ING. EDSON TONIÑO HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

GUATEMALA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

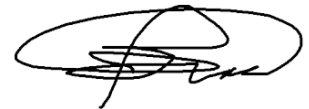
DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Inga. Adela María Marroquín González
EXAMINADOR	Inga. Márylyn Caribel Rojas Maldonado
EXAMINADOR	Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS
ESPACIOTEMPORALES DEL NDVI Y SU RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA
EN LOS BOSQUES DE LAS CONCESIONES FORESTALES DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 21 abril de 2023.



Brandon René Sigüenza González



EEEFI-PP-0377-2023
Guatemala, 21 de abril de 2023

Director
Williams G. Álvarez Mejía
Escuela De Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ing. Álvarez


Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS ESPACIOTEMORALES DEL NDVI Y SU RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS BOSQUES DE LAS CONCESIONES FORESTALES DE GUATEMALA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Gestión y manejo ambiental - Impactos y medidas de mitigación en sistemas de agua potable, desechos sólidos, aguas residuales, sistemas atmosféricos, líticos y ecosistemas acuáticos y terrestres**, presentado por el estudiante **Brandon René Sigüenza González** carné número **201603003**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Energía Y Ambiente.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Edson Toniño Hernández Mazariegos
Ingeniero Agrónomo en 1966
Carné Compañero No. 6354
Mtro. Edson Toniño Hernández Mazariegos
Asesor(a)


Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría





Mtro. Edgar Darío Álvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



EEP.EIQ.0376.2023

El Director de la Escuela De Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS ESPACIOTEMORALES DEL NDVI Y SU RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS BOSQUES DE LAS CONCESIONES FORESTALES DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Brandon René Sigüenza González**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Williams G. Álvarez Mejía; Mg.I.Q., M.U.I.E.
Director
Escuela De Ingeniería Química

Guatemala, abril de 2023



Decanato
Facultad e Ingeniería
24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.9.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Ambiental, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS ESPACIOTEMORALES DEL NDVI Y SU RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS BOSQUES DE LAS CONCESIONES FORESTALES DE GUATEMALA**, presentado por: **Brandon René Sigüenza González** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Aurelia Anabela Córdova Estrada', enclosed in a simple oval outline.

Firmado digitalmente por AURELIA ANABELA CORDOVA ESTRADA Fecha: 30/05/2023 10:24:29 p.m. Razón: Orden de impresión Ubicación: Facultad de Ingeniería, USAC.

Inga. Aurelia Anabela Córdova Estrada
Decana



Guatemala, mayo de 2023

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2023 Correlativo: 9 CUI: 2995322160101

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial, Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas, Licenciatura en Matemática, Licenciatura en Física, Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM), Guatemala, Ciudad

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme permitido realizar una más de mis metas.
Mis padres	Por haberme apoyado en todo momento para poder cumplir con esta meta de vida.
Mis hermanas	Debbie y Estefany Sigüenza, por acompañarme a lo largo de mi vida.
Familia y amigos en general	Por sus buenos deseos y las experiencias vividas.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios donde cultive tantos conocimientos y experiencias
Facultad de Ingeniería	Por ser la fuente de los conocimientos que me permitieron desarrollar esta investigación
Mi asesor	Msc. Ing. Edson Toniño Hernández por sus recomendaciones y apoyo para poder concluir mi trabajo de graduación

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
3. JUSTIFICACIÓN	11
4. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	15
5. HIPÓTESIS	17
6. MARCO TEÓRICO.....	19
6.1. El clima y los ecosistemas forestales de Guatemala.....	19
6.1.1. Época lluviosa.....	20
6.1.2. Época seca	20
6.1.3. Regiones climáticas de Guatemala	21
6.1.4. Variabilidad del clima en Guatemala	21
6.1.4.1. Análisis de anomalías climáticas	22
6.1.5. Ecosistemas forestales de Guatemala	24

6.1.6.	Concesiones Forestales de Guatemala	26
6.2.	Los bosques y su respuesta a las condiciones climáticas.....	28
6.2.1.	Los bosques como elementos reguladores del cambio climático.....	29
6.2.2.	Tolerancia de los sistemas forestales a climas extremos	30
6.2.3.	Sanidad vegetal de los bosques y la variabilidad climática	32
6.3.	Sensores remotos aplicados al monitoreo de los bosques	33
6.3.1.	Limitaciones relacionadas a la escala y la resolución temporal de las imágenes satelitales	34
6.4.	Monitoreo espaciotemporal de las masas arbóreas	36
6.4.1.	El papel de las series temporales.....	36
6.4.2.	Métodos estadísticos aplicados al análisis de tendencias de series temporales.....	37
6.4.2.1.	Prueba de Mann Kendall	38
6.4.3.	Índices vegetales utilizados en monitoreo de la vegetación.....	40
6.4.3.1.	Índice de vegetación de diferencia normalizada.....	42
6.4.4.	Variables climáticas que inciden en el comportamiento espaciotemporal del NDVI.....	44
7.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	47
8.	METODOLOGÍA	51
8.1.	Tipo de estudio.....	51
8.2.	Diseño de investigación	51

8.3.	Variables.....	51
8.4.	Fase 1: exploración bibliográfica	52
8.5.	Fase 2: recolección de la información	53
8.6.	Fase 3: estimar la tendencia espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales.....	56
8.7.	Fase 4: clasificar las anomalías climáticas registradas en el área de las concesiones forestales	59
8.8.	Fase 5: evaluar la relación espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal y la variabilidad climática.....	61
8.9.	Resultados esperados	65
9.	TECNICAS DE ANÁLISIS	67
9.1.	Instrumentos e insumos para la recolección de datos.....	67
9.2.	Herramientas para el procesamiento de la información.....	67
9.3.	Herramientas de análisis estadístico	67
9.4.	Herramientas para la representación de datos.....	68
10.	CRONOGRAMA.....	69
11.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	71
	REFERENCIAS	73
	APÉNDICES	83
	ANEXOS.....	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Ubicación de las concesiones forestales de Guatemala.....	28
Figura 2.	Obtención de datos históricos de NDVI, precipitación y temperatura.....	56
Figura 3.	Pasos para estimar la variación quinquenal/interdecadal del NDVI.....	57
Figura 4.	Procedimiento general para la estimación de las tendencias de NDVI.....	59
Figura 5.	Anomalías de NDVI precipitación y temperatura	62
Figura 6.	Correlación entre el NDVI, la precipitación y la temperatura	64
Figura 7.	Diagrama de Gantt del proyecto de tesis.....	69

TABLAS

Tabla 1.	Variables del estudio.....	52
Tabla 2.	Criterio para la interpretación de los valores Z en el análisis de tendencia del NDVI.....	58
Tabla 3.	Clasificación del índice de lluvia con base en los valores de RAI.....	60
Tabla 4.	Criterio que se utilizará para clasificar las anomalías climáticas.....	61
Tabla 5.	Niveles de correlación posibles entre el NDVI, la precipitación o la temperatura.....	63

Tabla 6. Posibles resultados en la prueba de significancia del coeficiente de Pearson.....64

Tabla 7. Costos de la investigación.....72

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
α	Alfa
β	Beta
CO_2	Dióxido de carbono
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
Ha	Hectáreas
\geq	Mayor o igual que
$>$	Mayor que
\leq	Menor o igual que
$<$	Menor que
m	Metros
mm	Milímetros
nm	Nanómetros
%	Porcentaje

GLOSARIO

Anomalía climática	Variación de la observación de un elemento climático con respecto a su media histórica o periodo base
Bosque	Ecosistema complejo cuya vegetación predominante son especies arbóreas
Google Earth Engine	Plataforma de procesamiento en la nube de Google
MODIS	Instrumento de medición científico que se encuentra a bordo de un satélite
NDVI	Índice de la vegetación que ayuda a medir el verdor, estado, condición o salud de la vegetación
Píxel	Unidad mínima y homogénea que constituye una grilla o una imagen
Precipitación	Cantidad de agua líquida o sólida que cae en un periodo determinado por unidad superficie
Sanidad vegetal	Se refiere a la salud de la vegetación condicionada por la presencia de plagas y patógenos, dispersadas por la actividad humana o la naturaleza.

Satélites Landsat	Constelación de satélites puestos en órbita por la NASA para la captura de información de la superficie terrestre.
Sensores remotos	Instrumentos que permiten captar información de un objeto o fenómeno desde la distancia
Serie temporal	Sucesión de datos medidos en determinados momentos y ordenados cronológicamente
SIG	Sistema de información geográfico
Temperatura media	Promedio de las temperaturas registradas en un área y periodo determinado

RESUMEN

Con esta investigación se busca determinar el grado de influencia de la variabilidad climática en el estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala. Para ello se analizarán las tendencias del NDVI para identificar patrones de cambio en el estado de la sanidad vegetal de los bosques a lo largo de 32 años.

El análisis de la variabilidad se centrará en reconocer los tipos de anomalías climáticas que han afectado el área de estudio durante el periodo 1990-2022. Una vez identificadas, se procederá a estudiar la relación existente entre el comportamiento espaciotemporal del NDVI y las variaciones de precipitación y temperatura en diferentes escalas de tiempo.

Como producto de estos análisis se busca determinar si la salud de la vegetación forestal puede verse comprometida ante el fenómeno de la variabilidad climática. Asimismo, se pretende mejorar la capacidad de los concesionarios para detectar signos de deterioro en la salud de la vegetación forestal.

OBJETIVOS

General

Determinar el grado de influencia de la variabilidad climática en el estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022.

Específicos

1. Estimar la tendencia espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022.
2. Clasificar las anomalías climáticas que se registran en el área de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022.
3. Evaluar la relación espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal y la variabilidad climática en los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022.

INTRODUCCIÓN

Por medio de esta investigación se podrá determinar como el estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala ha respondido ante las variaciones climáticas registradas en el área, incluidas anomalías de precipitación y temperatura. De este modo, se podrán evidenciar signos de deterioro o mejora en la salud de la vegetación forestal. Asimismo, se busca delimitar áreas que precisen la implementación de medidas urgentes, y que como consecuencia de climas extremos, sean más vulnerables ante la ocurrencia de incendios y la proliferación de plagas y patógenos.

Se utilizará el NDVI como indicador del estado de la sanidad de los bosques, y se analizará su tendencia espaciotemporal en el largo plazo. Posteriormente, por medio de la clasificación de las anomalías climáticas registradas en el área se estudiarán los cambios en la distribución espacial y la variabilidad temporal de la precipitación y la temperatura. Una vez se haya profundizado en este aspecto, se procederá a evaluar como la dinámica del NDVI en espacio y tiempo, está relacionada con los fenómenos climáticos identificados.

En el departamento de Petén, dentro de la Reserva de la Biosfera Maya, la problemática central es el incremento de la tasa de pérdida de cobertura forestal, principalmente en la zona de amortiguamiento. Las causas de esta problemática se atribuyen a actividades humanas, tales como incendios forestales y la extracción selectiva para fines energéticos. Sin embargo, existen otros fenómenos que pueden ocasionar un deterioro en la calidad de los ecosistemas forestales.

Actualmente, en la zona aún no se ha estudiado como los fenómenos de variabilidad climática pueden afectar la salud de la vegetación forestal. Su conocimiento es importante, dado que la capacidad de autorregulación de los ecosistemas forestales puede verse comprometida, y con esto generar un efecto de sinergia con las actividades antropogénicas que están afectando el área actualmente.

Un aspecto relevante de esta investigación es que sus resultados podrán ser utilizados como indicadores de la calidad de los ecosistemas forestales, por lo que se podrá medir que tan efectivas han sido las acciones de conservación a lo largo del tiempo. Lo anterior mejorará el control y seguimiento del área, generando un aumento en la trazabilidad del monitoreo de las especies forestales. Asimismo, los análisis no se limitan a un área en concreto, sino que pueden desarrollarse a nivel de país, en otras tierras con vocación forestal y las diferentes áreas protegidas legalmente establecidas en Guatemala.

Por otro lado, todos los análisis propuestos, incluida la estimación de tendencias del NDVI y el estudio de la variabilidad climática, se realizarán en el área de las concesiones forestales a nivel de píxel a lo largo de un periodo de 32 años. Lo anterior significa que se debe contar con una base de datos robusta, equipo de gran capacidad de procesamiento, e imágenes satelitales de calidad y resolución media. Esto no representará ningún impedimento para el desarrollo de la investigación, dado que toda la información necesaria y las plataformas de procesamiento que se utilizarán serán de libre acceso y gratuitas.

Se dejará constancia de la forma en la se debe procesar y analizar la información, para que cualquier persona o entidad estatal pueda reproducir los análisis que aquí se proponen. Con lo anterior, se beneficiará no solo a los concesionarios, sino también a instituciones públicas, como el INAB y el CONAP,

al contar con una herramienta que ayude a evaluar el estado de la sanidad vegetal de los bosques de Guatemala.

En cuanto a la conformación de la investigación, se tiene la siguiente estructura:

En el capítulo uno se presentan los conceptos teóricos necesarios para fundamentar los criterios que se aplicarán en la metodología, y los que se referirán en el análisis y discusión de resultados. En este apartado, se busca profundizar en la relación existente entre las especies forestales y las condiciones climáticas, su tolerancia a climas extremos, el conocimiento sobre el área de estudio, los indicadores utilizados para evaluar la salud de la vegetación forestal, los métodos y las técnicas estadísticas aplicadas en el estudio de estos fenómenos.

En el capítulo dos se expondrá el desarrollo de la investigación. Contendrá la recolección de datos y su procesamiento. Se realizará la estimación de tendencias del NDVI, incluyendo el cálculo del estadístico Z y el análisis de significancia correspondiente. Posteriormente, se abordará el fenómeno de la variabilidad climática. Para ello, se analizarán los tipos de anomalías registradas en el área de las concesiones forestales, y el análisis de la tendencia de las variables de precipitación y temperatura mediante regresiones lineales. Finalmente, se evaluará la correlación entre el fenómeno de la variabilidad climática y el estado de la sanidad vegetal de los bosques, así como, la significancia de dicha correlación.

En el capítulo tres se incluirá el análisis de resultados, estructurado con base en el número de objetivos planteados. Es decir, se iniciará a discutir los resultados del análisis de tendencias del NDVI, posteriormente se discutirá sobre

los tipos anomalías climáticas identificadas, y finalmente se hablará sobre la relación espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal y la variabilidad climática.

Adicionalmente, en secciones posteriores se presentarán las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas, apéndices y anexos.

1. ANTECEDENTES

En Guatemala no se identificaron estudios en los cuales se aborde la respuesta de la dinámica espaciotemporal del NDVI a la variabilidad climática. En el ámbito internacional se identificaron varias investigaciones donde se estudia esta relación con diferentes enfoques. Las investigaciones más relevantes, se resumen a continuación:

Un estudio realizado por Gao et al. (2019) en el país de China, evalúa la relación espacial heterogénea entre los factores climáticos y el NDVI a largo de 31 años. Para evaluar dicho fenómeno, Gao et al. (2019) utilizan un modelo de regresión ponderada geográficamente. Entre los indicadores climáticos utilizados, se destaca la precipitación, la temperatura y la humedad relativa; además del modelo ya mencionado, Gao et al. (2019) realizaron un análisis de tendencias, utilizando como indicador del cambio en las tendencias, la pendiente de un modelo de regresión lineal. Dentro de sus hallazgos, se puede mencionar que la temperatura condicionó de manera determinante la distribución espacial observada en el NDVI.

En términos de correlación, Gao et al. (2019) concluyeron que la temperatura promedio y la temperatura máxima presentaron una correlación negativa significativa con el NDVI. Lo anterior condujo a Gao et al. (2019) a concluir que el declive en la actividad de la vegetación en el Norte de China se debía a los incrementos en la temperatura. Con respecto a la humedad, Gao et al. (2019) determinaron que puede regular la actividad de la vegetación hasta cierto punto, dado que si se presenta una humedad excesiva se puede inhibir la actividad de la vegetación. En términos generales, el principal

hallazgo de Gao et al. (2019) es que para comprender la relación del NDVI y múltiples factores climáticos, se debe analizar la distribución espacial y la variabilidad temporal de todas las variables implicadas.

Para profundizar en el análisis espaciotemporal del NDVI, se debe mencionar la publicación de Measho et al. (2019) quienes estudian los cambios en la dinámica de la vegetación derivados del incremento de la variabilidad climática, que conducen a la generación de condiciones de estrés hídrica. Las técnicas geoespaciales utilizadas por Measho et al. (2019) incluyen un análisis de la tendencia del NDVI y el cálculo de la correlación de este índice con variables climáticas. Para poder evaluar la tendencia espacial del NDVI Measho et al. (2019) emplearon un modelo de regresión lineal. Como indicador de los cambios en las tendencias del NDVI Measho et al. (2019) utilizaron la pendiente de la regresión y la significancia de dichas tendencias la determinó con la prueba F.

La conclusión más importante de Measho et al. (2019) fue que la precipitación resultó ser el principal factor que condujo al decrecimiento del verdor de la vegetación en el área de estudio. Estadísticamente, Measho et al. (2019) encontraron que existía una correlación positiva significativa entre el NDVI promedio y la precipitación, sobre todo en la época de crecimiento de la vegetación. Según Measho et al. (2019), la explicación a este comportamiento se debió a la variabilidad espacial y las fluctuaciones de la precipitación, que ocasionaron sequías graves y un incremento de la aridez.

La comprensión del efecto de la variabilidad climática sobre el NDVI se contempla en la publicación de Dagnachew et al. (2020), quienes además incorporan una metodología interesante que permite diferenciar que tipo de efectos producen un deterioro en el estado de la vegetación. Como variable

representativa de la variabilidad climática Dagnachew et al. (2020) utilizaron únicamente la precipitación. Para observar el comportamiento espaciotemporal del NDVI y la precipitación, Dagnachew et al. (2020) evaluaron las tendencias utilizando la pendiente de Theil Sen y un análisis de significancia con Mann Kendall con un nivel de confianza del 95 %.

Adicionalmente, Dagnachew et al. (2020) demostraron que el análisis de tendencias con residuales es útil para diferenciar la degradación de la vegetación inducida por la actividad humana de la provocada por la variabilidad de la precipitación. Para poder evaluar la relación espaciotemporal entre la precipitación y el NDVI Dagnachew et al. (2020) utilizaron el coeficiente de correlación de Pearson.

En otro apartado, Dagnachew et al. (2020) presentan una metodología relevante que incorpora un nivel de profundización mayor en la comprensión de la relación del NDVI y variación estacional de la precipitación, a través de un modelo que incorpora periodos de retardo en las observaciones registradas de la precipitación. Este fue el aspecto más relevante de la investigación de Dagnachew et al. (2020), ya que permitió comprender como responde el NDVI ante diferentes variaciones estacionales de la precipitación. De lo anterior, Dagnachew et al. (2020) concluyeron que el NDVI fue más sensible a las variaciones de la precipitación producidas 3 o 4 meses antes de los cambios observados en el estado de la vegetación.

La contextualización del análisis de la variabilidad climática y su relación con la dinámica vegetal en un ecosistema forestal, se aborda en el estudio de You et al. (2021), quienes realizan un análisis de sensibilidad de la dinámica de la vegetación ante la variabilidad climática en una zona de transición de bosque y estepas al Norte de China. Para desarrollar este análisis

contemplaron varias variables, entre las que se pueden citar la precipitación, la temperatura, el NDVI, la evapotranspiración potencial, el índice de calor y de frío. Para evidenciar la tendencia en el largo plazo de estas variables You et al. (2021) utilizaron la prueba de Mann Kendall, la pendiente de Sen y la prueba de Mann Whitney y Pettit.

Asimismo, para encontrar relaciones significativas entre el NDVI y las variables climáticas You et al. (2021) emplearon el coeficiente de Pearson y Spearman. Con respecto a esta relación, You et al. (2021) determinaron que en las áreas forestales la temperatura promedio se correlacionó positivamente con el NDVI, mientras que la temperatura máxima se correlacionó de manera parcial. En cuanto a la tendencia de las variables, You et al. (2021) establecieron que el área forestal se caracterizaba como una región seca y cálida dada la presencia de la zona de transición con estepas, tendencias de decrecimiento en la precipitación e incrementos en la evapotranspiración potencial. De igual manera, You et al. (2021) concluyeron que estas tendencias de cambio significativas coincidían con la ocurrencia de fases intensas del Niño.

El estudio de variables climáticas adicionales a la precipitación y la temperatura se desarrolla en la publicación de Li et al. (2021), en la cual se busca identificar variaciones en las características espaciotemporales del NDVI y como se relacionan con la variabilidad de las condiciones climáticas en la meseta de Loess del país de China. En su estudio, Li et al. (2021) consideraron la precipitación, la humedad, la presión atmosférica, la temperatura del aire y las horas de insolación. Se analizaron específicamente las características espaciotemporales de las tendencias del NDVI durante el periodo 1985-2015, su correlación con las variables climáticas, y la influencia

de otros aspectos como la topografía del terreno, la ubicación geográfica, y el tipo de vegetación.

Para poder analizar las tendencias del NDVI en el largo plazo, los autores combinaron el método de Theil Sen que permite obtener la magnitud de la pendiente y la prueba Mann Kendall para evaluar la significancia de la trayectoria de la serie temporal. Para medir la correlación se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados de Li et al. (2021) muestran que existió una alta correlación de la temperatura del aire (99.9%) y de la precipitación (99.6%) con el comportamiento espaciotemporal del NDVI en una escala de medición mensual. Cuando la correlación se midió a una escala interanual Li et al. (2021) determinaron que la relación disminuyó drásticamente. Cabe resaltar, que las otras variables presentaron una correlación menor que la precipitación y la temperatura del aire.

La identificación de los factores que condicionan los cambios en la cobertura vegetal se profundiza en la investigación de Zhao et al. (2021) desarrollada en la cuenca de Guanzhong al noreste de China. Zhao et al. (2021) determinaron que uno de estos factores eran las condiciones climáticas, específicamente las variaciones de precipitación y temperatura. Para llegar a esta conclusión, Zhao et al. (2021) utilizaron la prueba estadística de Mann Kendall para encontrar patrones de cambio en el estado de la cobertura vegetal, medidos a través del NDVI. Posteriormente, para medir la influencia de las condiciones climáticas en los cambios observados, Zhao et al. (2021) evaluaron la relación lineal del NDVI con la precipitación y la temperatura.

Para poder aislar los efectos antropogénicos de los provocados por la variabilidad natural, Zhao et al. (2021) realizaron un análisis de residuales del

NDVI obtenido mediante una regresión lineal. En este caso los residuos del modelo considerado por Zhao et al. (2021) representaron la contribución de las actividades humanas a los cambios observados en la cobertura vegetal. Zhao et al. (2021) determinaron que los cambios observados en la cobertura vegetal se atribuían mayoritariamente a las actividades humanas, con lo cual concluyó que las medidas de mitigación pueden generar un impacto positivo y revertir el deterioro en el estado de la cobertura vegetal.

Como síntesis de los hallazgos encontrados en las investigaciones analizadas en este apartado, se encontró que la variabilidad climática puede ocasionar un deterioro en la salud de la vegetación forestal, y que las variables climáticas que condicionan este fenómeno de manera determinante son la precipitación y la temperatura. Asimismo, se observó que las técnicas más utilizadas en el estudio de tendencias espaciotemporales del NDVI incluyen modelos de regresión lineal, la pendiente de Theil Sen y la prueba no paramétrica de Mann Kendall. Finalmente, para analizar la relación entre el NDVI y las variables climáticas se han utilizado coeficientes de correlación y de regresión lineal.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA, 2020), entre el 2003 y 2020 la cobertura forestal nacional disminuyó un total de 1,360,617 ha, lo cual se interpretó como una disminución significativa.

En el departamento de Petén, específicamente en la Reserva de la Biosfera Maya, Bullock et al. (2020) determinaron que aproximadamente 17 % del área forestal del año 2000 había sido transformada en otros usos para el año 2017 y que la tasa de deforestación en la zona de amortiguamiento era de 1.4 % por año. Entre las causas de esta problemática nacional se pueden mencionar la extracción selectiva incontrolada, los incendios forestales, la proliferación de plagas y enfermedades, entre otras. Todas estas causas se han estudiado y abordado a través de estrategias nacionales y sistemas de monitoreo. Sin embargo, la relación entre la variabilidad climática y la calidad de los ecosistemas forestales ha sido poco estudiada en el país.

De acuerdo con Mokhena et al. (2016), los climas extremos como las sequías y las lluvias prolongadas son capaces de inducir un decrecimiento en el número de especies forestales y una disminución de la resiliencia de los bosques, lo cual aumenta la vulnerabilidad de las masas forestales ante incendios, plagas y enfermedades. Por lo tanto, lo anterior se traduce en un deterioro de la salud de la vegetación forestal.

Por su parte, el cambio climático puede llegar a incrementar los efectos negativos sobre las masas forestales causados por la variabilidad climática. Esta última se encuentra relacionada con las teleconexiones climáticas que

afectan al país de forma cíclica. En el estudio de Bardales et al. (2019), se expone que la teleconexión climática más importante en Guatemala y la región Centroamericana es El Niño Oscilación Sur (ENOS) y que dependiendo de la fase que se presente ocasiona un déficit o un incremento en la precipitación.

Por otro lado, Marroquín y Gómez (2019) indica que como consecuencia del cambio climático en Guatemala se han reportado sequías severas, eventos de lluvia prolongados e incrementos de la temperatura, que modifican la humedad ecosistémica, generando condiciones de estrés hídrico, que aumentan la incidencia de incendios forestales.

Por lo tanto, las especies forestales se verán grandemente afectadas por los fenómenos antes mencionados ya que según Sonali et al. (2021), el clima está relacionado con muchos procesos biofísicos, y este puede vulnerar sus funciones ecológicas y poner en riesgo el desarrollo de las especies forestales. En el caso de la Reserva de la Biosfera Maya, United States Agency for International Development (USAID, 2021) indica que ha evidenciado una mejora en sus condiciones biofísicas, sin embargo, es un área que presenta amenazas graves como incendios forestales y un aprovechamiento insostenible de sus recursos forestales.

Por su parte, Chu et al. (2019) determinaron que un decrecimiento en la precipitación y un aumento de la temperatura afecta las condiciones de desarrollo de la masa arbórea, por lo que la salud y en general el estado de la sanidad vegetal de los bosques podría verse afectada.

Por lo tanto, lo anterior lleva a plantear la pregunta principal del estudio:

¿Cuál es el grado de influencia de la variabilidad climática en el estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022?

Para responder la pregunta principal se proponen las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es la tendencia espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022?
- ¿Qué tipo de anomalías climáticas se registran en el área de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022?
- ¿Cuál es la relación espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal y la variabilidad climática en los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022?

3. JUSTIFICACIÓN

La realización del presente trabajo se justifica en la línea de investigación de impactos y medidas de mitigación en sistemas de agua potable, desechos sólidos, aguas residuales, sistemas atmosféricos, líticos y ecosistemas acuáticos y terrestres de la Maestría en Energía y Ambiente.

En el informe ambiental del Estado de Guatemala elaborado por Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2016) se afirma que “la conservación de especies silvestres es fundamental para mantener el proceso evolutivo natural y la adaptabilidad de los ecosistemas” (p. 73). Con lo cual se fundamenta la necesidad de evaluar el estado de las especies forestales y determinar si la calidad de los ecosistemas forestales se ha visto afectada ya sea por actividades antropogénicas o fenómenos climáticos.

Los resultados que se obtengan en esta investigación pueden emplearse como indicadores ecológicos que midan la eficacia de las medidas de mitigación, en el largo plazo, en reservas forestales o para trazar metas que busquen la restauración paulatina de ecosistemas forestales; asimismo, los análisis efectuados sobre la cobertura forestal de las concesiones forestales pueden realizarse en cualquier otra área boscosa de interés nacional.

Este estudio se destaca al poder realizarse de forma remota y a gran escala, por lo que se puede utilizar como un análisis preliminar del área de interés, para luego delimitar zonas prioritarias donde sea preciso la concentración de recursos humanos y financieros. Lo anterior, puede

representar entonces una reducción en los costos técnicos y operativos de la gestión forestal del área.

Otro aspecto relevante de esta investigación es su carácter integral dado que se estudiará tanto la distribución espacial como la variabilidad temporal de la dinámica de la vegetación forestal, para luego evaluar la incidencia de las condiciones climáticas anómalas en su comportamiento. Por lo tanto, los concesionarios y las autoridades a cargo podrán aumentar la trazabilidad que se tiene sobre el área y con esto facilitar la adopción de medidas de mitigación o adaptación.

Para la realización de esta investigación será necesario analizar patrones de cambio del NDVI a nivel de píxel y su relación con la variabilidad climática a lo largo de 32 años. La integración de dichos pixeles puede utilizarse para representar las áreas donde el estado de la sanidad vegetal de los bosques presenta mejoras o signos de degradación. Asimismo, se generarán mapas cartográficos que faciliten la identificación geográfica de estas áreas, se calculará su superficie y se adjuntarán gráficos que pueden ser utilizados en informes estadísticos.

Toda la información recopilada quedará a disposición de instituciones como el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP), el Instituto Nacional de Bosques (INAB) y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), para que puedan fortalecer el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SIGAP) y el sistema nacional de monitoreo forestal. De igual forma cualquier institución pública o privada, organización comunitaria o unidad investigativa nacional o regional podrá hacer uso de esta información. Se dejará indicado la forma en que se debe recolectar, procesar e interpretar la información para que cualquier usuario pueda efectuar los análisis propuestos.

El área de interés de este estudio refleja la importancia de esta investigación, dado que al delimitar áreas prioritarias que requieran implementar medidas urgentes, permitirá coadyuvar en la conservación de la biodiversidad y la protección de especies forestales con alto valor genético, científico y económico.

4. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

En este estudio se analizarán tendencias espaciotemporales del NDVI, y luego se evaluará en qué medida la variabilidad climática, representada a través de la variación de la precipitación y la temperatura, influye en el estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala. La primera parte del análisis permitirá estudiar la dinámica del estado de la sanidad vegetal de los bosques en las concesiones forestales, ya que incrementos o decrecimientos en la tendencia del NDVI, pueden interpretarse como una mejora o un deterioro de la salud de la vegetación forestal.

Por otro lado, determinar en qué medida la variabilidad climática está relacionada con el comportamiento observado del NDVI, ayudará a reconocer que existe otra causa diferente de las actividades antropogénicas, que influye en el estado de la sanidad vegetal de los bosques. En Guatemala, los efectos ocasionados por las actividades humanas en la dinámica de la vegetación forestal son bastante conocidos, sin embargo, la influencia que poseen los comportamientos anómalos del clima en esta dinámica aún es incierta.

La necesidad del monitoreo de las especies forestales en áreas de interés nacional radica en el alto valor ecológico que poseen, definido por sus funciones de hábitat y regulación, con las cuales albergan especies de gran valor científico y condicionan el clima local de los ecosistemas. Mediante esta investigación se pondrá de manifiesto como el análisis de la dinámica del NDVI

puede ser útil como una herramienta informativa del deterioro de las especies forestales.

El presente estudio presentará la información necesaria para que las instituciones públicas y privadas puedan delimitar aquellas áreas forestales que muestren un declive en la salud de la vegetación forestal. De esta forma las autoridades podrán evaluar la necesidad de implementar mecanismos de mitigación dentro las mismas y fortalecer las acciones guiadas por los planes de manejo forestal e instrumentos ambientales.

Al lograr lo anterior, se estará fortaleciendo el control y seguimiento sobre las concesiones forestales, y si se extrapola a otras áreas de interés nacional, al Sistema Nacional de Áreas Protegidas y el sistema nacional forestal.

5. HIPÓTESIS

Se plantea un estudio cuantitativo con un diseño no experimental de tipo longitudinal de tendencia, que se basa en la observación de hechos del pasado, por lo que no se plantea una hipótesis.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. El clima y los ecosistemas forestales de Guatemala

La diversidad de ecosistemas en Guatemala, según indica Pérez et al. (2018) está ligada a las características fisiográficas y ambientales del país. Dentro de las características ambientales, el autor destaca el componente del clima, haciendo alusión al comportamiento de variables climáticas como la precipitación, la temperatura y la humedad. En cuanto al comportamiento del clima en Guatemala Pérez et al. (2018) explican que este se ve influenciado por la circulación de las masas de agua, en el mar Atlántico y Pacífico, y el movimiento de las masas de aire, específicamente en la zona de convergencia intertropical (ZIT).

La influencia de la circulación oceánica y su interacción con la atmósfera es determinante a la hora de realizar una descripción del clima en Guatemala. Marroquín y Gómez (2019) afirman que:

El clima en Guatemala está asociado a la influencia de los regímenes de vientos del noreste, con aportes de humedad provenientes del mar Caribe y el Golfo de México, y los regímenes de viento del suroeste, con aportes de humedad del océano Pacífico. (p. 9)

Lo anterior determina que el clima en nuestro país únicamente este definido por dos estaciones o épocas, que Marroquín y Gómez (2019)

enuncian como época seca y lluviosa. Asimismo, esto también enmarca el territorio en un clima tropical.

6.1.1. Época Lluviosa

De acuerdo con Marroquín y Gómez (2019) la ocurrencia de la época lluviosa está condicionada a la confluencia de los vientos alisios en la ZIT y el fortalecimiento del sistema de alta presión en el Golfo de México. Los autores detallan que esta época inicia gracias al acercamiento de la ZIT a nuestras latitudes y los grandes sistemas nubosos cargados de humedad que son arrastrados hasta esa zona, provocando lluvias a su paso y que suelen dar origen a sistemas de baja presión (ciclones). Sin embargo, cuando el anticiclón del golfo de México se fortalece, los vientos alisios se debilitan y ocurren en el país lo que Marroquín y Gómez (2019) denominan como periodo seco o canícula. Según los autores la época lluviosa inicia en mayo y finaliza en octubre, produciéndose dicho periodo seco entre julio y agosto.

6.1.2. Época seca

En la época seca ocurre un comportamiento similar al detallado en la época lluviosa, que da paso al inicio de la canícula. Marroquín y Gómez (2019) aseguran que “la época seca da inicio con el aumento de la presión atmosférica y la migración de las masas de aire frío proveniente de la zona polar (frentes fríos) causando un decremento de la temperatura e incrementando la velocidad del viento” (pp. 9-10). Sus características varían con la temperatura, ya que entre noviembre y febrero se presentan las temperaturas más bajas, mientras que entre marzo y mayo la temperatura tiende a incrementar. Marroquín y Gómez (2019) también resaltan que pueden llegar a presentarse lluvias locales como consecuencia de los frentes fríos.

6.1.3. Regiones climáticas de Guatemala

La delimitación de unidades homogéneas que posean características climáticas similares puede llevar a una aproximación sobre la distribución de la diversidad biológica de un territorio. Se habla de aproximación, dado que para Pérez et al. (2018) una clasificación climática puede ayudar a comprender de una forma muy general la diversidad de un ecosistema.

Una clasificación de este tipo, según menciona Pérez et al. (2018), son las desarrolladas por Wladimir Köpen y Charles Thornthwaite. En Guatemala, según explica Marroquín y Gómez (2019), la clasificación climática se elaboró utilizando el método de Thornthwaite, y posteriormente fue actualizada en el 2008. De acuerdo con Marroquín y Gómez (2019), se definieron las regiones “Región Franja Transversal del Norte, Región Occidente, Región Petén, Región Pacífico, Región Caribe, Región Altiplano Central, Región Bocacosta y Región Valles de Oriente” (p. 10).

6.1.4. Variabilidad del clima en Guatemala

“Las variables climáticas tienden a oscilar en el transcurso del tiempo, causando modificaciones temporales al clima, lo que se denomina variabilidad climática” (Montealegre, 2009, como se citó en Bardales et al., 2019). Para la región Centroamericana y Guatemala específicamente, Bardales et al. (2019) explican que el resultado de la interacción entre la atmósfera y el componente oceánico es un fenómeno que da origen a la variabilidad climática que se presenta en nuestro país. Bardales et al. (2019) indicaron que se pueden mencionar fenómenos como “El Niño Oscilación Sur (ENOS) y El Atlántico Tropical Norte (ATN)” (pp. 24-26).

Tal y como explica Bardales et al. (2019), el ENOS se relaciona con un gradiente en la presión atmosférica y la temperatura de las masas de agua ya sea en Oceanía o en el Pacífico sur oriental. Asimismo, Bardales et al. (2019) detallan que se pueden presentar dos fases dependiendo la región donde ocurre dicho gradiente, las cuales se han denominado como “fase negativa (ocurrencia del Niño) y fase positiva (ocurrencia de la Niña)” (p. 25). Para Guatemala, los escenarios climáticos son distintos dependiendo la fase que se presente. Bardales et al. (2019) se pronuncian ante ello aseverando que la ocurrencia del Niño trae consigo canículas severas, mientras que la Niña está asociada a precipitaciones extremas.

6.1.4.1. Análisis de anomalías climáticas

De acuerdo con Grebrechorkos et al. (2020), en el análisis de la variabilidad del clima es importante integrar las variables climáticas en diferentes escalas de tiempo, realizando por ejemplo, un análisis de variabilidad a nivel estacional, interanual e interdecadal. Para el análisis de variabilidad a nivel estacional y anual, Grebrechorkos et al. (2020) recomiendan calcular la desviación estándar, mientras que para el análisis de variabilidad interdecadal, los autores recomiendan calcular variaciones con respecto a la media histórica. Posteriormente, Grebrechorkos et al. (2020) indica que dichas anomalías pueden clasificarse como positivas o negativas en cada escala de tiempo analizada.

$$\text{Anomalía} = X_i - \bar{X} \quad (1)$$

Donde \bar{X} representa la media histórica de la variable climática y X_i el valor de la variable observada.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (3)$$

Donde S_d es la desviación estándar, X_i es el valor de la variable observada, \bar{X} el promedio de la variable en el periodo de interés, y N número de observaciones.

Por otro lado, Sein et al. (2021) explican que puede resultar conveniente estandarizar las anomalías, para poder comparar de mejor forma los fenómenos observados:

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{S_d} \quad (4)$$

Donde Z representa el valor estandarizado de la variable climática, X es el valor de la variable en cierto periodo i , \bar{X} es el promedio histórico, y S_d es la desviación estándar. Adicionalmente, Sein et al. (2021) aconsejan acompañar el análisis de anomalías de variables climáticas con regresiones lineales, para la identificación de patrones espaciotemporales en las variables climáticas.

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 t \quad (5)$$

Donde Y_t representa la variable dependiente (precipitación o temperatura), t el predictor, y β_0 y β_1 coeficientes.

En lo que respecta a la evaluación de la relación entre la anomalía de la precipitación y la ocurrencia del fenómeno del Niño Oscilación Sur, Oliveira

et al. (2020) establece que es necesario el cálculo del Índice de Anomalía de Precipitación (RAI, por sus siglas en inglés), con el cual se puede obtener tanto anomalías positivas como negativas de la precipitación.

$$RAI+ = \frac{(N - M)}{(M_{m\acute{a}x} - M)} \quad (6)$$

$$RAI- = \frac{(N - M)}{(M_{m\acute{i}n} - M)} \quad (7)$$

Donde N es la precipitación observada en el año donde se calcula la anomalía (mm), M es la precipitación promedio anual de la serie histórica (mm), $M_{m\acute{a}x}$ es el promedio anual de diez años con la mayor precipitación de la serie histórica (mm), y $M_{m\acute{i}n}$ es el promedio anual de diez años con la menor precipitación de la serie histórica (mm).

6.1.5. Ecosistemas forestales de Guatemala

Como se explicó anteriormente, tratar de comprender la complejidad de un ecosistema en un territorio depende de los criterios que se apliquen al momento de delimitar una unidad homogénea en términos ya sea de sus características fisiográficas o ambientales.

Con el afán de realizar una delimitación mucho más certera de los ecosistemas de Guatemala, Pérez et al. (2018) deciden utilizar el sistema de clasificación de Holdridge, que en términos de los autores considera las características bioclimáticas de un territorio. Para entender el propósito de esta metodología, es necesario citar a Derguy (2017) quien menciona lo siguiente: “el modelo de Holdridge es un sistema de zonificación ecológica que identifica unidades bioclimáticas (zonas de vida) en base a variables climáticas, latitud,

y altitud” (p. 140). A su vez, Derguy (2017) da pautas, a partir del descubrimiento de otros autores, sobre como las zonas de vida son capaces de relacionar las condiciones climáticas de un territorio con las formas de vida presentes y las fisonomías de la vegetación.

Una vez aplicado el sistema de clasificación de Holdridge, Pérez et al. (2018) fueron capaces de delimitar zonas de vida con base en la humedad ecosistémica tales como “bosques secos, húmedos, muy húmedos y pluviales” (p. 38); todos ellos con carácter tropical. Y tomando en cuenta el piso altitudinal, Pérez et al. (2018) identificaron bosques “premontano, montano bajo, montano y sub andino” (p. 38).

En cuanto a características puntuales de estas zonas vale la pena mencionar que Pérez et al. (2018) destaca a los bosques pluviales por las características climáticas que presentan y la diversidad biológica que albergan. Además, Pérez et al. (2018) resaltan que estas zonas presentan las mayores precipitaciones, afirmando que existen “precipitaciones por encima de los 4000 mm, y el bosque pluvial premontano tropical presenta los valores más altos, con 5375 mm” (p. 40).

Por otro lado, a nivel de especies forestales MAGA (2020) determinó que Guatemala cuenta con “bosque latifoliado (1,761,289 ha), bosque de coníferas (183,119 ha), bosque mixto (728,600 ha), y bosque de manglar (23,664)” (p. 17). MAGA (2020) también menciona las plantaciones forestales, árboles dispersos, y la vegetación arbustiva baja como los matorrales y guamil, como parte de la cobertura vegetal de Guatemala.

6.1.6. Concesiones Forestales de Guatemala

De acuerdo con Radachowsky et al. (2012), las concesiones forestales de Guatemala surgieron dentro de la Reserva de la Biosfera Maya en el departamento de Petén entre el periodo de 1990-2000. La reserva, según Radachowsky et al. (2012) fue delimitada para la garantizar la conservación de diversidad biológica en esta área, sin embargo, se permite el aprovechamiento forestal si se rige a las limitaciones de la zonificación del área.

Según Radachowsky et al. (2012) la reserva cuenta con las siguientes zonas:

- La zona núcleo, constituida por parques nacionales, biotopos, y la reserva para la investigación científica y el turismo de bajo impacto;
- La zona de amortiguamiento conformada por una banda de 15 km de ancho en el extremo sur de la reserva; y
- La zona de usos múltiples que incluye 848,440 hectáreas donde el uso sostenible de la tierra de bajo impacto es permitido. (p. 19)

Rodas et al. (2014) comentan que la zona de usos múltiples fue contemplada desde su delimitación, como un área donde era permitido el aprovechamiento sostenible, siempre que el mismo se adecuara los objetivos de conservación de la reserva.

Según explican Rodas et al. (2014), las concesiones forestales surgieron para resolver el conflicto que existía entre la población comunitaria y las agencias estatales, quienes impedían la extracción de recursos debido al establecimiento de la Reserva de la Biosfera Maya en los años 1990.

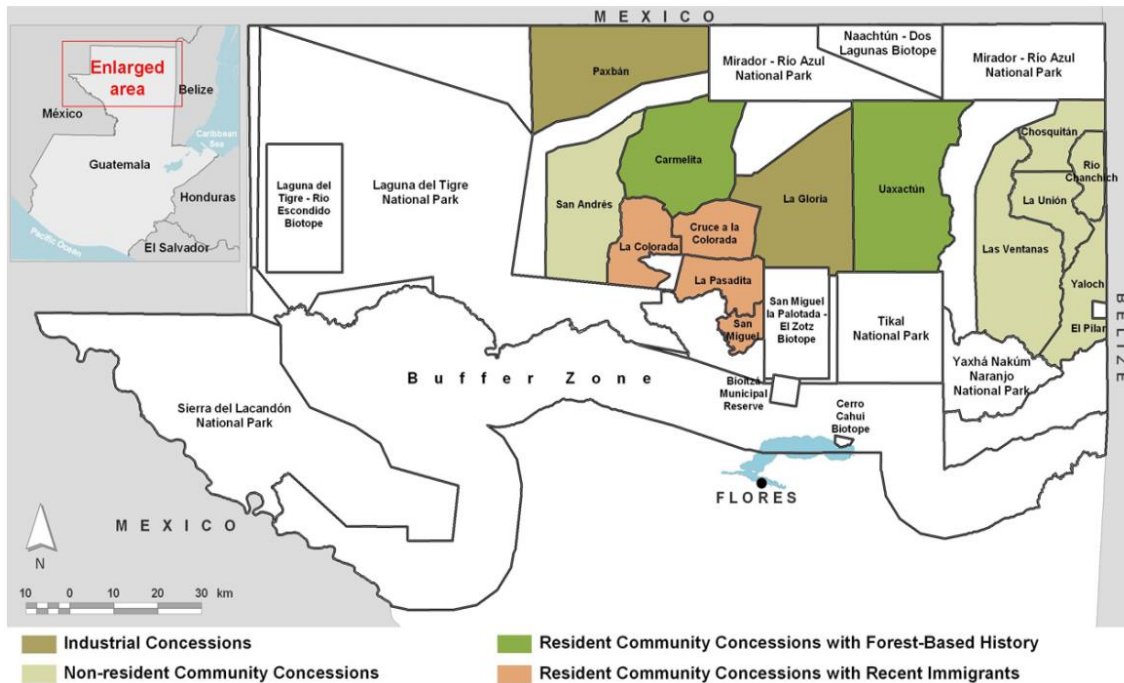
Rodas et al. (2014) argumenta que el CONAP resolvió el conflicto otorgando concesiones forestales a las comunidades que históricamente habitaban las zonas aledañas al área. Sin embargo, Rodas et al. (2014) aseguran que la condición otorgada a los concesionarios era que debían ser comunidades legalmente establecidas y contar con el apoyo de una ONG, quien mejoraría sus capacidades técnicas y financieras para el desarrollo de planes operativos, planes maestros, identificación de impactos, entre otros.

Con base en lo estudiado por Rodas et al. (2014), para el año 2012 existían un total de 14 concesiones, dos de ellas otorgadas a industrias y doce a comunidades, con una extensión de más de 500,000 hectáreas dentro la zona de usos múltiples (ZUM). Las categorías de estas concesiones incluyen “concesiones industriales, concesiones, comunitarias no residentes en la ZUM, concesiones comunitarias residentes en la ZUM, y concesiones comunitarias residentes con migraciones recientes” (Rodas et al., 2014, p. 20).

De acuerdo con la síntesis efectuada por Rodas et al. (2014), la concesiones comunitarias otorgadas a las organizaciones de San Miguel La Palotada, La Pasadita y la Colorada fueron suspendidas en el año 2009.

Figura 1.

Ubicación de las concesiones forestales de Guatemala



Nota. Obtenido de Radachowsky, J., Ramos, V. H., McNab, R., Baur, E. H., & Kazakov, N. (2012). *Forest concessions in the Maya Biosphere Reserve, Guatemala: A decade later*. *Forest Ecology and Management*, 268, 18–28. p. 20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.043>

6.2. Los bosques y su respuesta a las condiciones climáticas

A continuación, se describe como relacionan los bosques con el componente climático y que implicaciones posee en el contexto del cambio climático.

6.2.1. Los bosques como elementos reguladores del cambio climático

“Existen muchos mecanismos a través de los cuales los bosques afectan el tiempo meteorológico y el clima” (Buba et al., 2020, p. 373).

Buba et al. (2020) establecen que los mecanismos más importantes por medio de los cuales los bosques afectan el clima incluyen “la evapotranspiración, la absorción y reflexión de la radiación solar, y el secuestro del carbono” (pp. 373-374). En primera instancia, Buba et al. (2020) mencionan que la evapotranspiración es un elemento clave en el ciclo del agua, ya que puede incrementar la precipitación en los ecosistemas, regular la temperatura dentro de los mismos, y mantener el porcentaje de nubosidad. Los bosques tropicales por su parte son capaces de disminuir la temperatura del aire a través del siguiente mecanismo: “la humedad transferida a la atmósfera forma grandes nubes que reflejan la radiación incidente (energía solar) y causa un mayor enfriamiento” (Buba et al., 2020, p. 373).

En lo que respecta a la interacción de los bosques con la radiación solar, Buba et al. (2020) concluyen que esta influye en la temperatura local, lo cual está íntimamente relacionado con las tasas de evapotranspiración.

Según explican Buba et al. (2020), la vegetación en una región condiciona la temperatura local, puesto que cada uno absorbe y refleja radiación en distintos porcentajes y posee distintas tasas de evapotranspiración. Al respecto los autores afirman que “los bosques absorben más radiación que las llanuras” (Buba et al., 2020, p. 373). Por lo tanto, confirman que una reducción en la cobertura forestal puede ocasionar una variabilidad en la temperatura local, llegando a afectar incluso la

precipitación, dado que la modificación de estos mecanismos puede originar sequías.

Por otro lado, el secuestro de carbono Buba et al. (2020) lo definen como un proceso natural metabólico, en el que, el CO₂ absorbido de la atmósfera se almacena en el planta. En particular, Buba et al. (2020) destacan los bosques, puesto que son capaces de almacenar grandes cantidades de carbono, lo cual ayuda a contrarrestar los efectos negativos derivados de una concentración excesiva de CO₂ en la atmósfera. Dicho efecto Buba et al. (2020) lo describen como un aumento en la capacidad de la atmósfera de almacenar calor, lo cual ocasiono el denominado calentamiento global.

A su vez, “la quema o descomposición de la materia forestal destruida libera el carbono a la atmósfera en forma de CO₂ lo cual, al ser un gas de efecto invernadero, absorbe el calor solar dentro de la atmósfera” (Buba et al., 2020, p. 374)

6.2.2. Tolerancia de los sistemas forestales a climas extremos

“Las especies forestales en el bosque poseen una esperanza de vida de más de 200 años y, en muchos casos, serán capaces de tolerar rangos razonables de fluctuaciones en el clima” (Mokhena et al., 2016, p. 3).

A pesar de ello, Mokhena et al. (2016) recalcan que lo anterior deja de ser válido cuando se presentan climas extremos como inundaciones, sequias y vientos fuertes, que pueden aumentar la mortalidad de los árboles, e inducir un decrecimiento en el número de especies forestales. Sin embargo existen excepciones, según indican Mokhena et al. (2016), dado que la genética y los

mecanismos de adaptación de algunas especies, juegan un papel importante en el grado de tolerancia de los sistemas forestales ante fluctuaciones significativas del clima.

Mokhena et al. (2016) cita especies como el ciprés de los pantanos o el pino de Balfour, los cuales han sobrevivido a múltiples ciclos de clima extremos. También mencionan las plantas herbáceas, las cuales “son bien conocidas por alterar su relación de brotes de raíz para aclimatarse a las condiciones de crecimiento” (Mokhena et al., 2016, p. 4).

A pesar de ello, Mokhena et al. (2016) mencionan que en muchas evaluaciones sobre cambio climático se ha determinado que la sequía y las lluvias intensas han ocasionado “la erosión de la capa fértil de los suelos, reducción en la relación de brotes de raíz y reducción de sus demandas energéticas como consecuencia de la deficiencia de agua durante las sequías” (p. 4). Por otro lado, los autores argumentan que algunos de los individuos que sustituyeron aquellos que murieron bajo estas condiciones pueden llegar a desarrollar mecanismos de adaptación, sin embargo, es muy probable que sucumban ante los cambios rápidos provocados por el cambio climático.

En cuanto a la resiliencia de los bosques, Rumann et al. (2018) indica lo siguiente: “la resiliencia de los bosques ante el cambio climático es una preocupación global dados los efectos potenciales del incremento en las perturbaciones, las temperaturas de calentamiento, y el incremento del estrés de humedad en las plantas” (p. 1).

En su estudio Rumann et al. (2018) encontraron evidencia de que la distribución de especies forestales puede cambiar, como consecuencia de la reducción en la resiliencia de los bosques ocasionada por una sequía post

incendio. Rumann et al. (2018) afirman que la reducción de los bosques de coníferas, dadas las condiciones antes mencionadas, puede aumentar la presencia de matorrales y pastizales en los ecosistemas afectados. Asimismo, Rumann et al. (2018) demostraron que los bosques deciduos y húmedos se ven mayormente afectados, y como consecuencia del incremento de la temperatura y el estrés hídrico, los escenarios post incendio donde se generen las condiciones climáticas adecuadas para la regeneración de los bosques se vuelven menos probables.

6.2.3. Sanidad vegetal de los bosques y la variabilidad climática

Según Lambert et al. (2015), la sensibilidad de los ecosistemas forestales a los climas extremos se debe a las edades tan grandes que poseen las especies forestales. Al respecto, Lambert et al. (2015) comenta que esto depende de las condiciones climáticas locales y del tipo de especie forestal. Sin embargo, los efectos de estos fenómenos climáticos pueden causar un declive en la salud de la vegetación forestal. En ese contexto, Lambert et al. (2015) indican que para poder detectar cambios en el estado de los ecosistemas forestales, se deben realizar observaciones en largo plazo.

De acuerdo con Lambert et al. (2015) los tres principales tipos de cambios observables son:

- Cambios graduales usualmente influenciados por el cambio climático, causados por la degradación gradual del medio ambiente;

- Cambios estacionales o fenológicos, correspondientes a modificaciones fenológicas tales como oscilaciones de la época de crecimiento; y
- Cambios abruptos relacionados con perturbaciones tales como deforestación o incendios forestales. (p. 3589)

En términos generales, para Lambert et al. (2015), un declive en la salud forestal se encuentra caracterizada por una crecimiento gradual o abrupto de la actividad de la vegetación causado por eventos climáticos extremos como sequias o la proliferación de patógenos. De cualquier forma, Lambert et al. (2015) aseguran que una pérdida significativa de la vitalidad de los bosques conduce a un aumento de la mortalidad de las especies forestales.

Asimismo, Jandl et al. (2019) establecen que las condiciones climáticas no solo afectan la capacidad de los ecosistemas forestales para proveer servicios, sino también los hace más vulnerables a los ataques de plagas y patógenos. Jandl et al. (2019) aseguran que existe una fuerte evidencia de que los brotes de escarabajos de la corteza y de insectos defoliadores están íntimamente relacionados con el cambio climático.

6.3. Sensores remotos aplicados al monitoreo de los bosques

Gao et al. (2020) expone muchas de las bondades y aspectos relevantes que poseen los sensores remotos cuando se utilizan en el estudio de la cobertura terrestre:

- Efectividad para mapear los usos de la tierra; realizar un análisis de sus cambios;
- Obtener información sobre la superficie terrestre y sus características como el índice de área foliar;
- Identificar áreas que exhiban perturbación forestal; y
- Estimación de la biomasa y estudios sobre cambios en el flujo del carbono. (p. 4)

6.3.1. Limitaciones relacionadas a la escala y la resolución temporal de las imágenes satelitales

De acuerdo con Gao et al. (2020), las dificultades que se presentan cuando se utilizan sensores remotos para monitorear la dinámica forestal están ligadas a los impedimentos de esta tecnología para detectar los cambios que suceden a nivel estructural en las masas boscosas.

Gao et al. (2020) comentan que cuando se estudia la degradación forestal con sensores remotos, el follaje de la vegetación puede llegar a constituir una barrera natural que impida observar los cambios estructurales que sucedan en una especie forestal. Sin embargo, Gao et al. (2020) hacen énfasis en la resolución temporal de los sensores remotos, ya que puede llegar a ser un parámetro importante a la hora de detectar la degradación forestal. Respecto a esta aseveración, Gao et al. (2020) comentan lo siguiente: “la degradación a menudo ocurre a una escala espacio temporal comúnmente por debajo de las capacidades de detección de la mayoría de las tecnologías de sensores remotos, sobre todo aquellos sensores multiespectrales” (p. 4).

Por el contrario, Gao et al. (2020) afirman que si bien los sensores remotos como los MODIS de 250 m presentan limitaciones en cuanto a la resolución espacial, no obstante, pueden verse favorecidos por la alta resolución temporal que poseen, dado que esto puede llegar a “suavizar” (ajustar de mejor forma) las series temporales. Dada esta ventaja, Gao et al. (2020) aseguran que los MODIS pueden ser útiles para detectar casi en tiempo real los cambios forestales, y pueden identificar de forma temprana signos de degradación forestal en un área determinada.

En cuanto a los satélites Landsat, Gao et al. (2020) los describen como los sensores remotos de mediana resolución más utilizados para analizar cambios en la cobertura forestal y para identificar la degradación forestal. A pesar de ser ampliamente utilizados, Gao et al. (2020) hacen notar que estos poseen una limitación en cuanto a su resolución espacial, cuando se utilizan para detectar la degradación forestal a nivel local. Por lo tanto, cuando el objetivo es evaluar la degradación forestal a nivel local, Gao et al. (2020) aconsejan utilizar imágenes de alta resolución temporal (ej. 10 m). Sin embargo, advierten que esto puede incrementar los costos y el tiempo de procesamiento de las imágenes.

Por otro lado, hablando del tema de la resolución temporal de forma concreta, Gao et al. (2020) la presentan como un parámetro vital a la hora de medir la dinámica de la degradación forestal. “Una caracterización precisa de la degradación forestal requiere largo periodos de observación que capturen el cambio forestal gradual” (Gao et al., 2020, p. 4.). De esta forma, Gao et al. (2020) aseguran que entre mayor sea la frecuencia con la que un satélite captura información sobre la superficie terrestre, más fácil será “diferenciar entre los cambios naturales de la cobertura forestal debidos a la fenología de la vegetación, de los causados por la degradación forestal” (p. 4).

6.4. Monitoreo espaciotemporal de las masas arbóreas

Para el monitoreo espaciotemporal de las masas arbóreas se deben considerar las características de las series temporales, los métodos estadísticos para su análisis, indicadores del estado de la salud de la vegetación, entre otros aspectos.

6.4.1. El papel de las series temporales

“En el monitoreo de la dinámica vegetal con sensores remotos, el análisis de series temporales puede ser definido como un acercamiento al análisis de la densidad temporal de imágenes satelitales a lo largo de un periodo de tiempo establecido” (Gao et al., 2020, p. 10).

Para Gao et al. (2020), la utilización de series temporales para identificar perturbaciones en los bosques significa utilizar información de un mismo punto (píxel) para identificar en qué momento específico, de un periodo determinado, el bosque presenta una perturbación. Al mismo tiempo, Gao et al. (2020) advierten que el análisis de series temporales no es una técnica de medición directa de la pérdida de vegetación debido a la perturbación, más bien es una herramienta que coadyuva en el mapeo preciso de la degradación forestal en un periodo de tiempo determinado.

En cuanto a la variables que se utilizan para construir las series temporales, Gao et al. (2020) indican que es común el uso de índices de vegetación. Asimismo, Gao et al. (2020) ponen como ejemplo los MODIS, específicamente el MOS13Q1, del cual se pueden obtener datos de “NDVI y EVI a una resolución de 250 m e intervalos de 16 días desde el año 2000” (p. 10).

“Una serie temporal de sensores remotos usualmente consiste de tres componentes: trayectoria, estacionalidad y residuos” (Gao et al., 2020, p. 10). Ampliando el tema de la trayectoria y la estacionalidad, Gao et al. (2020) explica que la trayectoria muestra la condición o la sanidad vegetal en el largo plazo, para poder identificar donde es estable, incrementa o disminuye; mientras que la estacionalidad muestra cambios repetitivos que suceden en época seca y lluviosa.

6.4.2. Métodos estadísticos aplicados al análisis de tendencias de series temporales

Los métodos estadísticos más utilizados para detectar tendencias en series temporales de datos hidrológicos y climáticos incluyen son definidos por Sonali & Kumar (2013):

- Pruebas basadas en la pendiente, como la regresión lineal de mínimos cuadrados (abreviada como LR) y el estimador robusto de la pendiente de Sens (abreviado como SS); y
- Pruebas basadas en rangos, la llamada Mann Kendall (abreviada como MK) y el coeficiente correlación de Spearman (abreviada como SRC) es también utilizada para detectar la trayectoria. (p .213)

6.4.2.1. Prueba de Mann Kendall

Sonali & Kumar (2013) la define como una prueba estadística no paramétrica que se clasifica entre las pruebas basadas en rangos. Sonali & Kumar (2013) explica que se debe calcular el estadístico “S”, el cual se define de la siguiente forma:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (8)$$

Donde “n” es el total de datos, “x_j” y “x_k” son datos en secuencia de la serie.

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} -1, & x_j - x_k < 0; \\ 0, & x_j - x_k = 0; \\ 1, & x_j - x_k > 0 \end{cases} \quad (9)$$

Sonali & Kumar (2013) indican que la varianza se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (10)$$

Donde “t_p” es el número de pares (observaciones iguales en un instante de tiempo) para el p-ésimo valor y “q” es el número de valores pares. Por el contrario, Sonali & Kumar (2013) comentan que la prueba se estandariza mediante el cálculo de Z:

$$Z = \left\{ \begin{array}{l} \frac{S - 1}{\sqrt{Var(s)}}, S < 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{Var(s)}}, S > 0 \end{array} \right\} \quad (11)$$

“Para la prueba de una tendencia monotónica a un nivel de significancia α , la hipótesis nula de que no existe tendencia se rechaza si el valor absoluto del estadístico estandarizado Z es mayor que $Z_{1-\alpha/2}$ ” (Sonali & Kumar, 2013, p. 215).

Wang et al. (2020) describen una de las ventajas de utilizar una prueba no paramétrica como Mann Kendall en lugar de una prueba paramétrica (ej. LR), y es que no se deben probar los supuestos de homocedasticidad y normalidad en la muestra de análisis. Wang et al. (2020) también aseguran que la prueba de Mann Kendall es menos sensible a los datos atípicos y los datos faltantes.

Por otro lado, Wang et al. (2020) comentan que a pesar de que Mann Kendall tiende a ser una prueba robusta y precisa en el análisis de tendencias de series temporales con las características antes descritas, la prueba pierde su potencia cuando se presenta la correlación serial, lo cual según Wang et al. (2020), es típico en series temporales de variables climáticas e hidrológicas.

Wang et al. (2020) explican que cuando existe una correlación serial positiva se tiende a aceptar en una mayor proporción la hipótesis nula, lo cual en palabras del autor significa caer en un error tipo I. De igual forma, Wang et al. (2020) argumentan que existen varias metodologías para eliminar la correlación serial, sin embargo aumentan la probabilidad de caer en el error tipo II, el cual es “aceptar H_0 cuando en realidad existe una tendencia” (p. 2).

Por lo tanto, Wang et al. (2020) concluye que se debe crear un balance entre la significancia (α) y potencia de una prueba (β), lo cual depende del objetivo del estudio que se esté realizando. Con respecto a este balance, Wang et al. (2020) indican que si el objetivo del estudio es evaluar la respuesta de un población ante los efectos derivados de la existencia de una tendencia, la potencia de la prueba debe ser la prioridad del investigador.

Con respecto a los efectos de la correlación serial, Wang et al. (2020) comenta que la potencia de la prueba disminuye cuando la correlación serial es positiva, sobre todo para muestras pequeñas con varianzas grandes, por lo que para disminuir este efecto, Wang et al. (2020) recomienda “aumentar el nivel de significancia de 0.05 a 0.1” (p. 11).

6.4.3. Índices vegetales utilizados en monitoreo de la vegetación

De acuerdo con los análisis de Giovos et al. (2021), los índices de vegetación se basan en diferentes longitudes de onda de reflectancia en el espectro electromagnético. Giovos et al. (2021) asevera que en el contexto de los sensores remotos el espectro electromagnético se divide en “azul (450 nm), rojo (650 nm), borde del rojo (700 nm), infrarrojo cercano (800-900 nm), e infrarrojo de onda corta (1300-2200 nm)” (p. 6).

Giovos et al. (2021) establecen que cada índice de vegetación permite obtener información diferente, dependiendo de la propiedad de la vegetación que se pretenda estudiar (biomasa, área foliar o salud de la vegetación). Tomando esto en consideración, Giovos et al. (2021) realizan la siguiente clasificación de los índices vegetales:

- Los utilizados para predecir la absorción de clorofila en la hoja. Los índices de vegetación frecuentemente utilizados que son sensibles a la biomasa y la densidad de la vegetación son: NDVI, EVI y SAVI;
- Los índices de vegetación que son más sensibles al contenido de agua en las hojas: NDWI, SIWSI, GVMÍ. (p. 7)

Spadoni et al. (2020) aseguran que cuando se combinan estos valores de reflectancia del espectro electromagnético, es posible obtener parámetros que sean capaces de sintetizar la información multiespectral que representa la interacción de la cobertura terrestre con la energía electromagnética incidente. A estos parámetros, Spadoni et al. (2020) los denominan índices espectrales, y aclara que los mismos incluyen los índices de vegetación, con los cuales es posible identificar la presencia de la cobertura vegetal sobre la superficie terrestre y evaluar sus variaciones.

En cuanto a su aplicación en el monitoreo de los bosques, Spadoni et al. (2020) comenta que existen muchos estudios en los cuales han utilizado los índices vegetales para analizar perturbaciones en los bosques. Los índices de vegetación más utilizados en el monitoreo forestal según Spadoni et al. (2020) incluyen el “índice de vegetación mejorado (EVI), índice de fenología vegetal (PPI) e índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)” (p. 2).

Para Spadoni et al. (2020) la información que se obtiene de cualquiera de estos índices se vuelve relevante cuando se analiza su tendencia temporal, porque permite realizar “una clara diferenciación entre los diferentes usos de

la tierra, percatarse sobre los periodos de brote y perdida de hojas de los bosques y de otros tipos de vegetación” (p. 2).

Pallarés et al. (2019) hablan de otras de las razones por las cuales los índices vegetales son tan ampliamente utilizados, y pone como ejemplo su simplicidad y su sensibilidad a las propiedades espectrales de la vegetación. Pallarés et al. (2019) enlistan las siguientes propiedades vegetales que se pueden detectar a través de estos índices: “propiedades bioquímicas de las hojas o una variable estructural del follaje, como el contenido de clorofila de la hoja (LCC), contenido de agua de la hoja (LWC), o el índice de área foliar (LAI)” (pp.1-2).

Asimismo, Pallarés et al. (2019) enfatizan que la respuesta espectral de la cobertura vegetal puede estar sujeta a efectos de ruido, sin embargo, el objetivo de estos índices es maximizar la sensibilidad de estas propiedades y minimizar los factores que deriven en una interpretación errónea. Pallarés et al. (2019) argumentan que estos factores están relacionados con “variaciones de otras propiedades de las hojas o del follaje, la reflectancia del suelo, la iluminación del sol y la composición de la atmosfera” (p. 2).

6.4.3.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada

Sonali et al. (2021) explican que el NDVI es un indicador numérico que puede ser útil en mediciones hechas a partir de sensores remotos y para evaluar si el área de interés posee vegetación verde viva. Sonali et al. (2021) aseguran que cuando se calcula el NDVI a partir de una imagen satelital, lo que realmente se está haciendo es realizar operaciones con bandas a nivel de píxel. De acuerdo con Sonali et al. (2021) la fórmula para calcular el NDVI es:

$$NDVI = \frac{NIR + RED}{NIR - RED} \quad (12)$$

“Donde RED es el rojo del espectro visible y NIR el infrarrojo cercano del espectro de reflectancia. El rango de longitud de onda del NIR es (750-1300 nm), y la banda roja es (600-700 nm)” (Sonali et al., 2021, p. 4). Sonali et al. (2021) establecen que el NDVI toma valores únicamente entre -1 y 1, y que dependiendo su valor se puede diferenciar entre el tipo de cobertura vegetal y su estado o condición.

Para Sonali et al. (2021), valores de $NDVI < 0.1$ corresponden a áreas sin cobertura vegetal (ej. Áreas urbanas o vegetación muerta), mientras que valores intermedios de NDVI de 0.2 a 0.3 corresponden a matorrales o pastizales. Por otro lado, Sonali et al. (2021) afirman que los valores altos de NDVI de 0.6 a 0.8 indican la presencia de bosques templados o tropicales, y cultivos agrícolas que presentan una vegetación saludable. En otras palabras, “el grado de verdor es igual a la concentración de clorofila” (Sonali et al., 2021, p. 4). Con respecto a lo anterior, Sonali et al. (2021) asegura que los valores de NDVI dependen del grado de absorción de la luz en el espectro visible del rojo por parte de la planta y la cantidad que es reflejada en el infrarrojo cercano.

De acuerdo con los análisis de Právělie et al. (2022), el NDVI ha sido el indicador ecológico más utilizado para analizar el estado de la vegetación y la productividad forestal, en estudios que tienen por objeto encontrar variaciones en el estado de las masas forestales inducidas por el cambio climático. Sobre todo, Právělie et al. (2022) aclaran que el NDVI se ha utilizado para estudiar el comportamiento de la vegetación de áreas con y sin bosque, y su relación con los cambios en el clima. “El NDVI se ha convertido en la herramienta mayormente utilizada para evaluar la vegetación forestal y no forestal alrededor del mundo” (Právělie et al., 2022, p. 5).

Prävălie et al. (2022) destacan las siguientes ventajas a la hora de utilizar el NDVI como indicador de la condición vegetal de los bosques:

- Está constituido por un bajo número de bandas espectrales (Únicamente NIR y RED);
- El fácil acceso a largas series de datos de bandas espectrales necesarias para su cálculo;
- Su confiabilidad general en el análisis de la densidad y la productividad vegetativa; y
- La madurez resultante de uso extensivo (histórico y actual) en el campo forestal y no forestal. (p. 5)

6.4.4. Variables climáticas que inciden en el comportamiento espaciotemporal del NDVI

“Muchos investigadores han estudiado la respuesta de la cobertura vegetal al cambio climático y actividades humanas en diferentes escalas de espacio y tiempo basándose en series temporales de NDVI” (Lin et al., 2020, p. 2).

La revisión de literatura efectuada por Lin et al. (2020), indica que los incrementos significativos del NDVI se han asociado a los efectos de los calentamiento global, lo que resulta en cambios en la temperatura del aire y de la precipitación. Lin et al. (2020) aseguran que la precipitación y la temperatura son los factores más importantes que inducen cambios en el NDVI, y dicha incidencia está sujeta a la ubicación geográfica. De acuerdo con

Lin et al. (2020), en regiones húmedas y templadas la temperatura influye más en los cambios de NDVI que la precipitación. Por el contrario, Lin et al. (2020) explican que en regiones áridas y semiáridas la precipitación se vuelve relevante.

Cabe resaltar que Lin et al. (2020) advierten que la respuesta del NDVI ante el cambio climático aún es incierta, y los estudios científicos aún no han estudiado a fondo estos mecanismos. Lo anterior según Lin et al. (2020), se debe a que las actividades humanas juegan un papel determinante en los cambios del NDVI, dado que si se generan impactos positivos en los ecosistemas se favorece la restauración ecológica y se reducen los efectos negativos causados por los climas extremos.

Lin et al. (2020), para evaluar la correlación entre el NDVI y las variables de precipitación y temperatura propone el uso del coeficiente de Pearson y análisis de significancia con la prueba de t. Para ello Lin et al. (2020) propone las siguientes ecuaciones:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

$$r_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (14)$$

$$r_{x,yz} = \sqrt{1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz,y}^2)} \quad (15)$$

$$t_{x,yz} = \frac{r_{x,yz}}{\sqrt{1 - r_{x,yz}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (16)$$

Donde r_{xy} , r_{xz} , r_{yz} son coeficientes de correlación entre “x” y “y”, “x” y “z”, “y” y “z”.

7. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

- 1.1. El clima y los ecosistemas forestales de Guatemala
 - 1.1.1. Época lluviosa
 - 1.1.2. Época seca
 - 1.1.3. Regiones climáticas de Guatemala
 - 1.1.4. Variabilidad del clima en Guatemala
 - 1.1.4.1. Análisis de anomalías climáticas
 - 1.1.5. Ecosistemas forestales de Guatemala
 - 1.1.6. Concesiones Forestales de Guatemala
- 1.2. Los bosques y su respuesta a las condiciones climáticas
 - 1.2.1. Los bosques como elementos reguladores del cambio climático
 - 1.2.2. Tolerancia de los sistemas forestales a climas extremos

- 1.2.3. Sanidad vegetal de los bosques y la variabilidad climática
- 1.3. Sensores remotos aplicados al monitoreo de los bosques
 - 1.3.1. Limitaciones relacionadas a la escala y la resolución temporal de las imágenes satelitales
- 1.4. Monitoreo espaciotemporal de las masas arbóreas
 - 1.4.1. El papel de las series temporales
 - 1.4.2. Métodos estadísticos aplicados al análisis de tendencias de series temporales
 - 1.4.2.1. Prueba de Mann Kendall
 - 1.4.3. Índices vegetales utilizados en monitoreo de la vegetación
 - 1.4.3.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)
 - 1.4.3.2. Variables climáticas que inciden en el comportamiento espaciotemporal del NDVI

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- 2.1. Recolección de datos
- 2.2. Estimación de la tendencia espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal
 - 2.2.1. Cálculo del NDVI
 - 2.2.2. Estimación del estadístico Z
 - 2.2.3. Análisis de significancia estadística
- 2.3. Clasificación de las anomalías climáticas registradas en el área de estudio

- 2.3.1. Análisis de anomalía anual de la precipitación y temperatura
- 2.3.2. Análisis de anomalía interdecadal de la precipitación y la temperatura
- 2.3.3. Análisis de tendencias de la precipitación y la temperatura con regresiones lineales
- 2.3.4. Clasificación de las anomalías identificadas
- 2.4. Evaluación de la relación espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal y la variabilidad climática
 - 2.4.1. Evaluación de la correlación estadística entre las anomalías climáticas y las anomalías del NDVI
 - 2.4.2. Análisis de la respuesta del NDVI a distintos periodos de retardo de la precipitación y temperatura
 - 2.4.3. Análisis de significancia de la correlación
- 3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
 - 3.1. Tendencia espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal de los bosques en el periodo 1990-2022
 - 3.2. Tipos de anomalías climáticas registradas en el área de las concesiones durante el periodo 1990-2022
 - 3.3. Relación espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal de los bosques y la variabilidad climática

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

8. METODOLOGÍA

8.1. Tipo de estudio

El presente estudio tendrá un enfoque cuantitativo en él se medirán o se estimarán magnitudes de las variables NDVI, precipitación y temperatura, y luego se analizará su comportamiento y relación mediante métodos estadísticos para poder describir los fenómenos observados durante el periodo 1990-2022.

8.2. Diseño de investigación

Se realizará un diseño no experimental de tipo longitudinal de tendencia, dado que se recolectará información de las variables NDVI, precipitación y temperatura en distintos instantes de tiempo y luego se evaluará como se han relacionado y cómo ha evolucionado el NDVI a través del periodo 1990-2022. La unidad de análisis de este estudio serán los bosques de las concesiones forestales de Guatemala.

8.3. Variables

A continuación se hace una descripción de las variables que se utilizarán en la investigación. Se presenta la definición operacional, sus dimensionales, y los indicadores que describirán su comportamiento.

Tabla 1.*Variables del estudio*

Variable	Definición operacional	Dimensionales	Indicadores
NDVI	Mide el estado de la sanidad vegetal en la cobertura forestal	adimensional	Valores entre 0.1 y 1 indican presencia de vegetación. Valores mayores a 0.6 se asocian con una vegetación saludable
Precipitación	Precipitación total que cae sobre la cobertura arbórea	mm	Posee una correlación positiva de moderada a fuerte ($r > 0$) con el NDVI en las escalas de tiempo analizadas
Temperatura	Temperatura de la superficie con cobertura arbórea	°C	Posee una correlación negativa de moderada a fuerte ($r < 0$) con el NDVI en las escalas de tiempo analizadas
Z (tendencia espaciotemporal)	Estadístico que evidencia la tendencia de una variable en el largo plazo	Adimensional	Valores mayores e iguales a 1.96 o menores e iguales a -1.96 se interpretan como tendencias significativas
r (relación espaciotemporal)	Mide la correlación lineal entre las variables en diferentes escales de tiempo	%/adm	Valores mayores o menores que cero con $p < 0.05$ indican una correlación significativa.
Tipo de anomalía climática	Variación de una observación con respecto a la media histórica	%/adm	Si es mayor a cero indica una anomalía positiva, y si es menor a cero indica una anomalía negativa

Nota. Descripción de las variables que se utilizarán en la investigación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

8.4. Fase 1: exploración bibliográfica

Previo al desarrollo de la investigación se crearán las bases teóricas que ayuden a comprender la relación que existe entre la dinámica vegetal de los bosques y el componente climático. También se indagará acerca de los efectos que produce la variabilidad climática en el estado y condición de la vegetación forestal, las variables climáticas que tienen mayor influencia en estos efectos, los indicadores útiles para medir el estado de la sanidad de la

vegetación, las técnicas más utilizadas para abordar el monitoreo espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal mediante el NDVI y la forma como se debe relacionar dicho estado con la variación de la precipitación y la temperatura.

Se buscará información referente a los criterios que deben aplicarse para recolectar y estimar las variables. Lo anterior será necesario para determinar si se deben calcular promedios, máximos o mínimos para la integración de las variables. De igual forma se deberá consultar en los diferentes estudios cuales son los intervalos más utilizados en la integración del NDVI cuando se analizan masas forestales.

En cuanto al estudio del componente climático, será imprescindible determinar cuáles son los métodos empleados en el análisis de las anomalías climáticas, las escalas de tiempo consideradas, y los criterios aplicables para su clasificación. En el caso de las técnicas estadísticas, la revisión documental permitirá identificar las consideraciones previas para su aplicación, sus limitaciones, la forma en la que se debe procesar la información e interpretar los resultados y los niveles de significancia más utilizados.

De los fundamentos teóricos también será posible determinar cuáles son los instrumentos y las plataformas idóneas para recolectar y procesar la información.

8.5. Fase 2: recolección de la información

Previo a recolectar la información climática histórica y estimar el NDVI en el periodo de interés, será necesario delimitar el área de estudio, comprendida por los bosques de las concesiones forestales de Guatemala.

Para delimitar la cobertura arbórea, se utilizará la metodología empleada por Prävălie et al. (2022), quienes utilizaron cinco mapas de uso de la tierra para “detectar áreas forestales comunes que son consideradas como constantes” (p. 5).

En el análisis de intersección Prävălie et al. (2022) utilizaron el software de pago ArcGIS, por lo que se utilizará en su defecto el software gratuito QGIS. En lo que respecta al área de las concesiones forestales, estas son delimitadas por el CONAP, por lo que se realizará la consulta a dicha autoridad para solicitar información referente a las áreas digitalizadas en *shapefiles*, ortofotos, hojas cartográficas, entre otros. Una vez se tenga el área digitalizada de las concesiones forestales se podrá delimitar el área forestal sobre la cual se realizarán las mediciones y análisis correspondientes

Los datos históricos de precipitación y temperatura se obtendrán por medio de la plataforma de procesamiento en la nube Google Earth Engine (GEE). Para la precipitación, se utilizará la base de datos de CHIRPS la cual contiene información desde 1981 hasta la fecha. Por otro lado, para la temperatura se utilizará el MODIS *Terra Climate* que posee registros a partir de 1958 hasta finales de 2021.

El NDVI, que se empleará como indicador de la sanidad vegetal, se estimará por medio de la ecuación 12, utilizando las bandas NIR y RED de imágenes satelitales Landsat 5 y 7. La razón de utilizar la información proveniente de estos satelitales se debe a que se requiere calcular el NDVI para el periodo 1990-2022 (32 años de información), lo cual se solventará dado que Landsat 5 posee datos para el periodo 1984-2012 y Landsat 7 para el periodo 1999-2023. Se debe aclarar que las imágenes Landsat que se utilizarán en este estudio ya están procesadas, por lo que únicamente será

necesario aplicar filtros para obtener las imágenes con la mayor calidad posible, sin comprometer la cantidad de información que se necesita recolectar. Sobre todo estos filtros se utilizarán para reducir a un porcentaje aceptable la nubosidad (<20 %).

Adicionalmente, se aplicará otro método para mejorar la calidad de la información del NDVI. Una vez se tenga la colección de imágenes con datos de NDVI se utilizará el método del máximo valor de la composición (MVC, por sus siglas en inglés), sugerido por Dagnachew et al. (2020). Esta metodología se define de la siguiente manera:

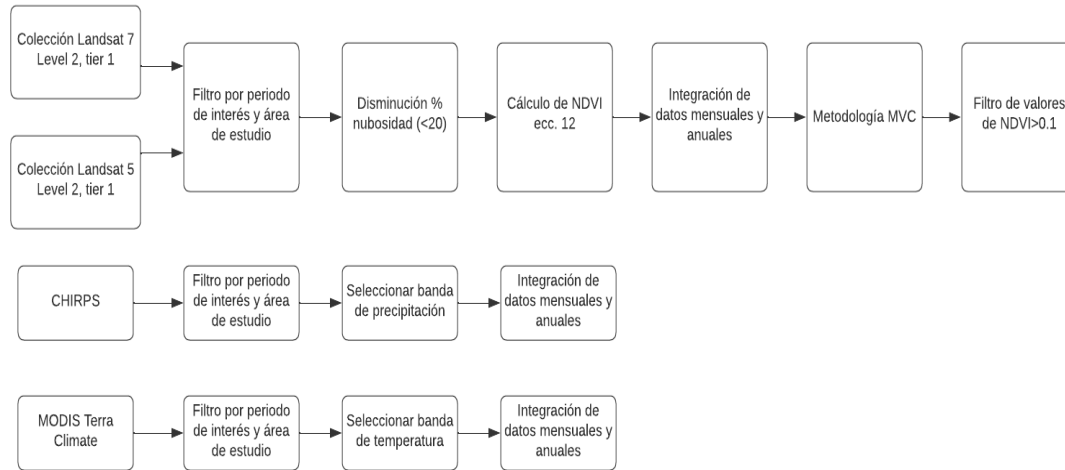
$$NDVI_i = \text{Max}(NDVI_{ij}) \quad (17)$$

Donde $NDVI_i$ es el valor del NDVI del mes i , y $NDVI_{ij}$ es el valor del NDVI del periodo j en el mes i . De acuerdo con Li et al. (2021), esto ayudará a disminuir las alteraciones provocadas por la nubosidad, la atmósfera y el ángulo de incidencia del sol. También será necesario establecer un intervalo para los valores de NDVI, para reducir el error de realizar mediciones sobre cobertura sin vegetación. Para ello se utilizará el criterio de Gao et al. (2022), quienes luego de aplicar la metodología MVC, seleccionaron únicamente los píxeles con valores de $NDVI > 0.1$.

Los criterios que se aplicarán para recolectar la información necesaria, se resumen a continuación:

Figura 2.

Obtención de datos históricos de NDVI, precipitación y temperatura



Nota. Metodología simplificada para el cálculo de NDVI y la extracción de datos precipitación y temperatura. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

8.6. Fase 3: estimar la tendencia espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales

Como se indicó en fases anteriores se utilizará el NDVI como indicador el estado de la sanidad vegetal de las concesiones forestales. Por lo tanto, en esta fase se utilizará la colección de NDVI ya procesada en la fase 2. Sin embargo, antes de realizar el análisis de tendencias para el NDVI, se realizará un análisis preliminar para evaluar de forma general los cambios que ha sufrido el NDVI a lo largo del tiempo. Esto es parte del proceso desarrollado por Právǎlie et al. (2022), quienes utilizaron la variación promedio interdecadal del NDVI como análisis empírico preliminar para identificar de manera practica diferencias positivas o negativas del NDVI a través de periodos concretos.

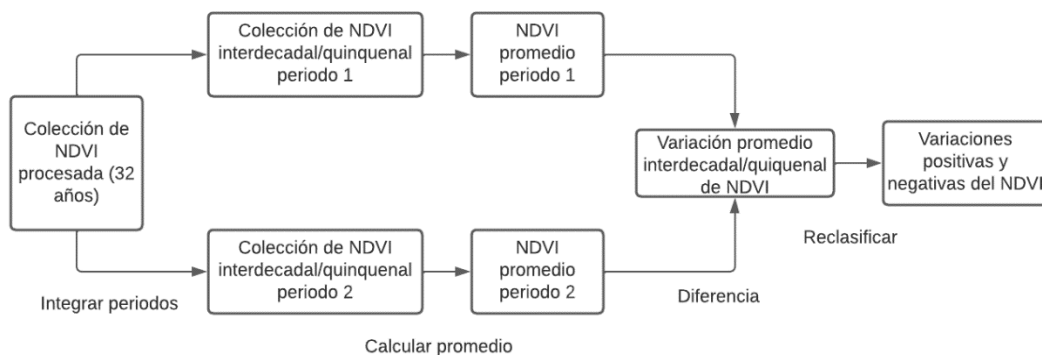
Bajo el contexto de esta investigación, se evaluará una variación promedio quinquenal e interdecadal. De acuerdo con los resultados de

Bardales et al. (2019), algunos de los fenómenos climáticos derivados de la variabilidad del clima en Guatemala se producen en periodos de 1 a 3 años, por lo que para detectar cambios del NDVI con mayor sensibilidad se utilizará un periodo tiempo más corto. Asimismo, se debe recordar que según el apartado teórico las especies forestales responden a las condiciones climáticas en el largo plazo, por lo que será conveniente analizar periodos de tiempo en el largo plazo.

Según Právālie et al. (2022) para el cálculo de dichas variaciones, se deben calcular promedios del NDVI en periodos de tiempo iguales, y luego obtener la diferencia entre los promedios de cada periodo. Vale la pena resaltar, que estas operaciones se realizaran a nivel de píxel, por lo que una vez realizado el proceso se podrán identificar áreas ya sea con variaciones positivas y negativas del NDVI, o sin ellas.

Figura 3.

Pasos para estimar la variación quinquenal/interdecadal del NDVI



Nota. Se realizará el mismo procedimiento para los seis quinquenios y los tres decenios. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

Luego de realizar el análisis preliminar, se llevará a cabo el análisis de tendencias espaciotemporales de NDVI para identificar posibles crecimientos o decrecimientos significativos a lo largo de 32 años.

Los criterios técnicos necesarios para la implementación de este análisis se describen a continuación:

Para la estimación de las tendencias se utilizarán las ecuaciones 8, 9, 10 y 11. El método que se aplicará será la prueba no paramétrica de Mann Kendall, para estimar la tendencia del NDVI al igual que Li et al. (2021). Utilizando el razonamiento de Zhang et al. (2020), el criterio para interpretar los valores de Z en un nivel de significancia de 0.05 es el siguiente:

Tabla 2.

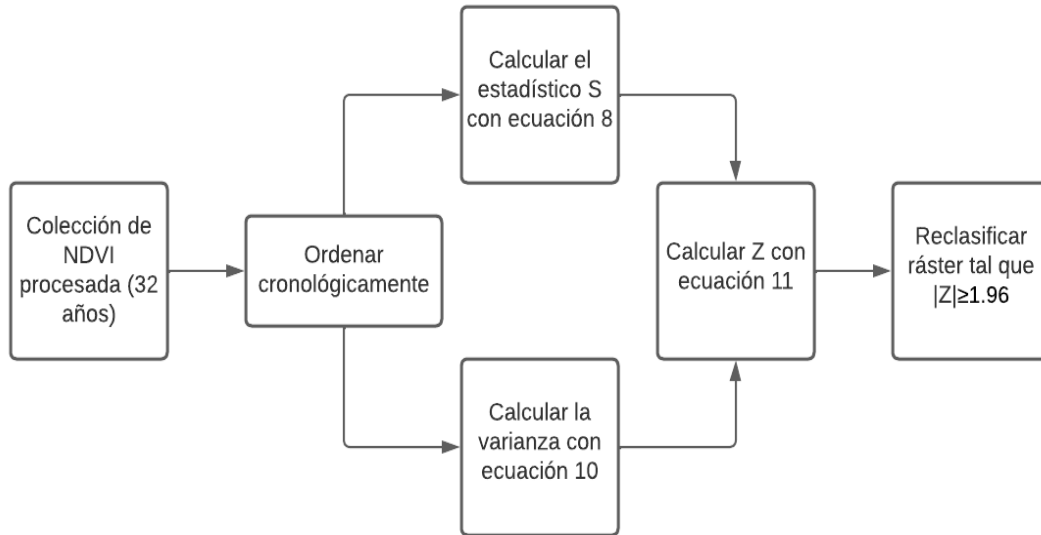
Criterio para la interpretación de los valores Z en el análisis de tendencia del NDVI

Z	Tendencia del NDVI
$Z \geq 1.96$	Mejora significativa
$-1.96 < Z < 1.96$	Estable
$Z \leq -1.96$	Degradación severa

Nota. Adaptado de Zhang, W., Wang, L., Xiang, F., Qin, W., & Jiang, W. (2020). *Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China* [Dinámica de la vegetación y su relación con el cambio climático a múltiples escalas de tiempo en el Río Yangtze y la cuenca del Río Amarillo, China]. *Ecological Indicators*, 110 (September 2019), 105892. p. 5. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105892>

Figura 4.

Procedimiento general para la estimación de las tendencias de NDVI



Nota. Metodología simplificada para el análisis de tendencias de NDVI con Mann Kendall. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

8.7. Fase 4: clasificar las anomalías climáticas registradas en el área de las concesiones forestales

El análisis de anomalías climáticas en el área de las concesiones forestales se realizará a nivel anual y decadal, siendo estas escalas de tiempo similares a las aplicadas por Grebrechorkos et al. (2020). Tomando como referencia los criterios de Grebrechorkos et al. (2020), primero se debe realizar una integración mensual de la precipitación y temperatura. Posteriormente, se calculará la precipitación y temperatura media anual. Adicionalmente, se obtendrá la media histórica para el periodo de análisis (1990-2022) tanto para la precipitación como la temperatura. En el caso del análisis de anomalías interdecadal, se obtendrán observaciones cada diez años para la precipitación y la temperatura, luego se calculará la anomalía con respecto a la media

histórica. Para determinar las anomalías se utilizará la ecuación 1, y luego se emplearán las ecuaciones 2, 3, y 4 para su estandarización.

Como aporte adicional al análisis de anomalías de la precipitación se calculará el índice de anomalía de precipitación (RAI) a lo largo del periodo 1990-2022. Los criterios necesarios para interpretar los valores de RAI, los describe Oliveira et al. (2020) a través de la siguiente tabla:

Tabla 3.

Clasificación del índice de lluvia con base en los valores de RAI

Índice de anomalía de precipitación (RAI)	Índice de lluvia
RAI \geq 4	Extremadamente lluvioso
RAI \geq 2 y RAI $<$ 4	Muy lluvioso
RAI $>$ 0 y RAI $<$ 2	Lluvioso
RAI=0	Sin anomalía
RAI $<$ 0 y RAI $>$ -2	Seco
RAI \leq -2 y RAI $>$ -4	Muy seco
RAI $<$ -4	Extremadamente seco

Nota. Obtenido de Oliveira, S., Souza, A., Abreu, M., Júnior, J., & Cavazzana, G. (2020). *SPATIOTEMPORAL CHARACTERIZATION OF PRECIPITATION IN MATO GROSSO DO SUL: RAINFALL DISTRIBUTION AND ANOMALY (RAI) ANALYSIS FOR CLIMATE PHENOMENA* [Caracterización espaciotemporal de la precipitación en Mato Grosso del Sur: distribución de la precipitación y análisis de sus anomalías (RAI) para el fenómeno climático]. 27, 181–201. p . 88. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.69407>

Por otro lado, para fortalecer el análisis de anomalías de precipitación y temperatura, también se desarrollará un modelo de regresión lineal para identificar patrones en el comportamiento espaciotemporal de estas variables climáticas tal y como lo explica Sein et al. (2021). Asimismo, tomando como referencia el concepto de anomalía climática y los resultados obtenidos por Sein et al. (2021), el criterio para clasificar las anomalías será el siguiente:

Tabla 4.

Criterio que se utilizará para clasificar las anomalías climáticas

Criterio de clasificación	Tipo de anomalía
$X_i - \bar{X} > 0; Z > 0$	Anomalía positiva
$X_i - \bar{X} < 0; Z < 0$	Anomalía negativa

Nota. Descripción del criterio aplicable, según el tipo de anomalía que se registre en el área forestal. Elaboración propia, realizado con Word.

8.8. Fase 5: evaluar la relación espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal y la variabilidad climática

Para realizar la evaluación propuesta se realizarán dos análisis: 1) analizar la correlación de anomalías del NDVI con las anomalías climáticas identificadas en la fase 4 y 2) analizar la respuesta del NDVI a la variación de la precipitación y la temperatura a distintas escalas de tiempo.

Para desarrollar el primer punto se tomará como base la metodología de Nanzad et al. (2019) para el cálculo de anomalías de NDVI. De acuerdo con Nanzad et al. (2019), primero se deberá integrar el NDVI durante el periodo de crecimiento de la vegetación. En el contexto de esta investigación, el NDVI se integrará a lo largo de la época lluviosa comprendida entre los meses de mayo y octubre. Dicha integración de los valores del NDVI se realizará para cada año desde 1990 hasta el 2022. Posteriormente, se calculará el promedio de estos valores para obtener el periodo base con respecto al cual se obtendrá la anomalía anual del NDVI. Las ecuaciones empleadas por Nanzad et al. (2019) para el cálculo de las anomalías del NDVI adaptadas al contexto de la investigación son las siguientes:

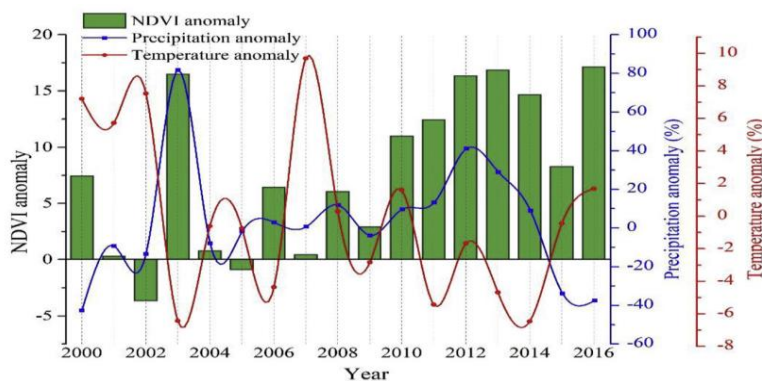
$$NDVI_{mean_i} = \frac{NDVI_1 + NDVI_2 + \dots + NDVI_n}{n} \quad (18)$$

$$\overline{NDVI} = \sum_{i=1}^n \frac{NDVI_{meani}}{n} \quad (19)$$

$$NDVI_{anomaly} = \frac{NDVI_{meani} - \overline{NDVI}}{\overline{NDVI}} * 100 \quad (20)$$

Donde $NDVI_n$ es el valor el NDVI del mes n en el periodo de época lluviosa, $NDVI_{meani}$ es el NDVI promedio de la época lluviosa, \overline{NDVI} es el NDVI promedio durante el periodo 1990-2022, $NDVI_{anomaly}$ es la anomalía anual del NDVI a lo largo del periodo 1900-2022. Una vez obtenida la anomalía del NDVI se correlacionará, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson, con las anomalías anuales de precipitación y temperatura obtenidas en la fase 4. Adicionalmente, se utilizará la prueba t para evaluar la significancia de la correlación.

Figura 5.
Anomalías de NDVI precipitación y temperatura



Nota. Se expone como las anomalías climáticas están relacionadas con las variaciones de NDVI. Obtenido de Nanzad, L., Zhang, J., Tuvdendorj, B., Nabil, M., Zhang, S., & Bai, Y. (2019). *NDVI anomaly for drought monitoring and its correlation with climate factors over Mongolia from 2000 to 2016* [Anomalías del NDVI en el monitoreo de la sequía y su correlación con factores climáticos en Mongolia del 2000 al 2016]. *Journal of Arid Environments*, 164(May 2018), 69–77. p. 75 <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.01.019>

Para evaluar la respuesta del NDVI a la variación de la precipitación y la temperatura en distintas escalas de tiempo, se utilizarán periodos de retardo en las observaciones a nivel de píxel de los valores precipitación y temperatura. Lo anterior forma parte de la metodología aplicada por Dagnachew et al. (2020), y que consiste básicamente en calcular la precipitación uno, dos y tres meses (o años) atrás de la observación que se tiene de los valores de NDVI, y luego evaluar la correlación del NDVI con la precipitación en cada instancia de tiempo. El mismo principio es aplicable a los valores de la temperatura. Para medir la correlación entre estas variables, se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson, definido por la ecuación 13, la cual es descrita por Lin et al. (2020). Para determinar el tipo de correlación entre las variables, Li et al. (2021) estableció los siguientes niveles de correlación:

Tabla 5.

Niveles de correlación posibles entre el NDVI, la precipitación o la temperatura

Nivel	Interpretación
$0.8 < r \leq 1$	Fuerte correlación
$0.3 < r \leq 0.8$	Correlación moderada
$0 < r \leq 0.3$	Correlación débil

Nota. Los valores de r pueden ser tanto positivos como negativos. Adaptado de Li, P., Wang, J., Liu, M., Xue, Z., Bagherzadeh, A., & Liu, M. (2021). *Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015* [Variación espacio temporal de las características del NDVI y su respuesta al clima en la meseta de Loess de 1985 al 2015]. *Catena*, 203(June 2020), 105331. p. 3. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105331>

Para medir la significancia de la correlación se utilizará la prueba t empleada por Li et al. (2021) en su estudio. Una interpretación de esta prueba a un nivel de significancia de 0.05, según Zhang et al. (2020), es la siguiente:

Tabla 6.

Posibles resultados en la prueba de significancia del coeficiente de Pearson

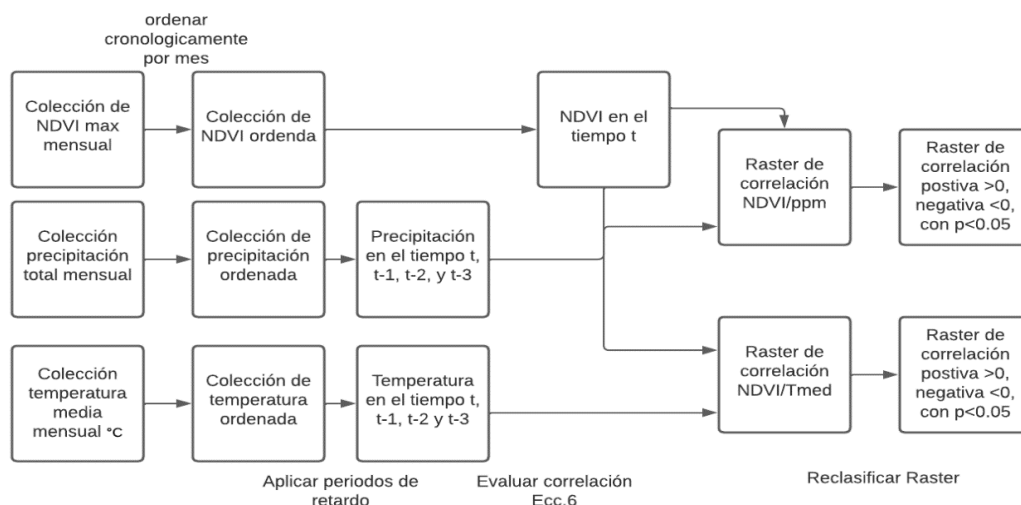
Resultado	Interpretación
$r > 0$ y $p < 0.05$	Correlación positiva significativa
$r > 0$ y $p > 0.05$	Correlación positiva no significativa
$r < 0$ y $p < 0.05$	Correlación negativa significativa
$r < 0$ y $p > 0.05$	Correlación negativa no significativa

Nota. Adaptado de Zhang, W., Wang, L., Xiang, F., Qin, W., & Jiang, W. (2020). *Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China* [Dinámica de la vegetación y su relación con el cambio climático a múltiples escalas de tiempo en el Río Yangtze y la cuenca del Río Amarillo, China]. *Ecological Indicators*, 110(September 2019), 105892. p. 5. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105892>

El procedimiento antes descrito se resume en la Figura 6:

Figura 6.

Correlación entre el NDVI, la precipitación y la temperatura



Nota. La correlación se realizará entre el NDVI y cada uno de los periodos de retardo establecidos. Elaboración propia, realizado con Lucidchart.

8.9. Resultados esperados

Los productos esperados para cada fase metodológica son los siguientes:

Para la fase de exploración bibliográfica se espera un compendio de documentos con cuales sea posible establecer los principios teóricos y los principios técnicos necesarios para el desarrollo de la metodología.

En la fase 2 se espera contar con una colección de imágenes de NDVI, con la cual se puedan obtener valores de NDVI a nivel de píxel tanto anuales como mensuales. Para el caso de la precipitación y la temperatura las colecciones de imágenes deben contar valores mensuales a nivel de píxel. Todas estas colecciones deberán contar con datos históricos para un periodo de 32 años. Asimismo, se obtendrá un objeto vectorial que delimite el área de las concesiones forestales.

Para la fase 3, en su etapa preliminar, se obtendrán mosaicos que contengan valores a nivel de píxel del NDVI promedio de 5 años y 10 años. Dado que el periodo del estudio comprende 32 años de análisis, se generarán 6 imágenes para la variación quinquenal y 3 imágenes para la variación decadal. Luego de realizar las operaciones planteadas para la obtención de las variaciones por quinquenio y decenio, se obtendrán imágenes cuyos valores de píxel serán las variaciones quinquenales y decadales del NDVI.

Como resultado del análisis de las tendencias espaciotemporales del NDVI se espera obtener un ráster que contenga los valores del estadístico Z de Mann Kendall a nivel de píxel, y un ráster reclasificado que permita diferencias entre las tendencias negativas y positivas del NDVI.

Adicionalmente, también se podrán obtener las series temporales por píxel, si se desea obtener más información sobre un área en concreto.

En la fase 4 se obtendrán varios objetos ráster que muestren las anomalías climáticas en las concesiones forestales a lo largo del periodo 1990-2022. Además, se generan objetos ráster que muestren las tendencias de la precipitación y la temperatura luego de desarrollar los modelos de regresión lineal. Como productos adicionales se pueden mencionar gráficos de barras que ilustren las anomalías identificadas en las diferentes temporalidades.

Finalmente en la fase 5, se espera obtener un ráster que muestre el porcentaje de correlación entre las anomalías climáticas identificadas y las anomalías del NDVI. Así como también gráficos de barras y de líneas que muestren las anomalías anuales de estas variables. En una segunda etapa, se obtendrán varios objetos ráster para cada periodo de retardo propuesto, que contengan a nivel de píxel el porcentaje de correlación de la variación de la precipitación y la temperatura con el NDVI en el área de los bosques de las concesiones forestales.

De manera general de la fase 3 a la fase 5, se elaborarán mapas cartográficos que ayuden visualizar de mejor manera los resultados.

9. TECNICAS DE ANÁLISIS

Para llevar a cabo los análisis presentados en el apartado metodológico serán necesarios los siguientes instrumentos de recolección de datos, herramientas de procesamiento, análisis estadístico y representación de datos:

9.1. Instrumentos e insumos para la recolección de datos

- Imágenes Landsat 5 y 7 *level 2, collection 2, Tier 1* a 30 metros de resolución.
- *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS)* resolución de 0.05°.
- *Monthly Climate and Climatic Water Balance for Global Terrestrial Surfaces, University of Idaho (MODIS TerraClimate)*.

9.2. Herramientas para el procesamiento de la información

- Plataforma de procesamiento en la nube Google Earth Engine
- Sistema de información geográfico gratuito QGIS
- R Studio
- Excel.

9.3. Herramientas de análisis estadístico

- Promedios de las variables climáticas y del NDVI

- Prueba no paramétrica Mann Kendall para el análisis de tendencia espaciotemporal del NDVI.
- Coeficiente de correlación de Pearson para medir el grado de asociación entre las variables de NDVI, la precipitación y la temperatura.
- Prueba de valor p y prueba t para evaluar la significancia.

9.4. Herramientas para la representación de datos

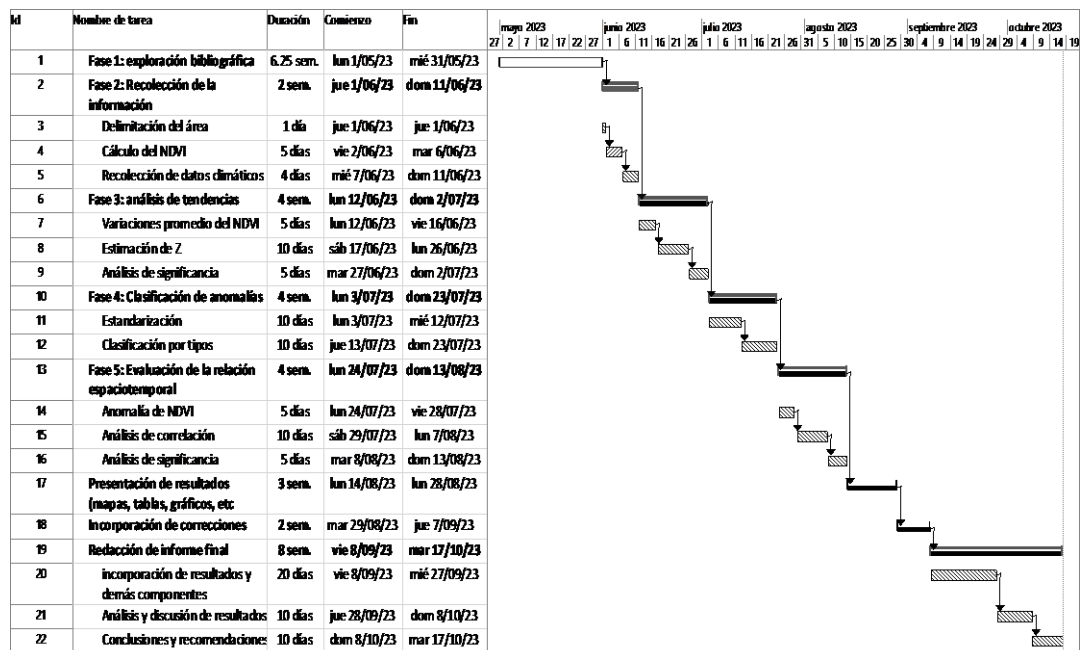
- Gráficos de series temporales para ejemplificar las tendencias del NDVI a nivel de píxel.
- Gráficos de regresión lineal para observar las tendencias de la precipitación y la temperatura.
- Gráficos de barras para representar las anomalías climáticas y del NDVI
- Mapas cartográficos para representar los resultados obtenidos en cada objetivo planteado.
- Tablas para resumir los resultados obtenidos en cada objetivo planteado.

10. CRONOGRAMA

A continuación se presenta el diagrama de Gantt que detalla la duración de las actividades por fases metodológicas y requisitos para la entrega del informe final.

Figura 7.

Diagrama de Gantt del proyecto de tesis



Nota. Detalle de la duración de las fases metodológicas y la realización del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Project.

11. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para el desarrollo de esta investigación se cuentan con los siguientes recursos:

- Recursos humanos: investigador y asesor, quien además de aportar su experiencia puede facilitar el acceso a información y contactos en las diferentes instituciones del estado. Se contará de igual forma con el apoyo indirecto del INAB y el CONAP atendiendo a lo establecido en la ley de acceso a la información pública.
- Recursos tecnológicos: se cuenta con una computadora personal y acceso a internet, lo cual será imprescindible para el acceso a la información y su procesamiento local y en la nube. Asimismo, se cuenta con un teléfono celular para poder establecer vínculos con las instituciones públicas para la solicitud de información o para programar visitas técnicas de ser necesario.
- Acceso a la información: todas las imágenes satelitales y el acceso a las bases de datos, que contienen los registros históricos de precipitación y temperatura a escala planetaria, son de libre acceso y gratuitos.
- Recursos financieros: todos los costos implicados en el desarrollo de esta investigación serán solventados por el estudiante. El desglose de estos costos se expone a continuación.

Tabla 7.*Costos de la investigación*

Recurso	Costo
Depreciación del equipo de computo	Q 750.00
Acceso a internet	Q 1,400.00
Imágenes satelitales Landsat 5 y 7 de 1990 a 2022	Q -
Datos históricos de precipitación y temperatura de 1990 a 2022	Q -
Prueba anti plagio	Q 220.00
Imprevistos	Q 1,500.00
Total	Q 3,870.00

Nota. Desglose de los costos necesarios para el desarrollo de la investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tomando en consideración los recursos disponibles y un costo total accesible para ser cubierto por el estudiante, se concluye que el desarrollo del estudio es factible.

REFERENCIAS

- Bardales, W., Castañón, C., & Herrera, J. (2019). Clima de Guatemala. *Primer Reporte de Evaluación Del Conocimiento Sobre Cambio Climático En Guatemala*, 20–39. [1RepCCGuaCap2.pdf \(sgccc.org.gt\)](#)
- Buba, F., Gajere, E., & Ngum, F. (2020). *Assessing the Correlation between Forest Degradation and Climate Variability in the Oluwa Forest Reserve, Ondo State, Nigeria* [Evaluación de la correlación entre la degradación forestal y la variabilidad climática en la reserva forestal Oluwa] . *American Journal of Climate Change*, 09(04), 371–390. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2020.94023>
- Bullock, E., Nolte, C., Segovia, A., & Woodcock, C. (2020). *Ongoing forest disturbance in Guatemala's protected areas* [En búsqueda de perturbación forestal en las áreas protegidas de Guatemala]. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(2), 141–152. <https://doi.org/10.1002/rse2.130>
- Chu, H., Venevsky, S., Wu, C., & Wang, M. (2019). *NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015* [Dinámica de la vegetación basada en el NDVI y su respuesta a cambios climáticos en la cuenca del Rio Amur-Heilongjiang]. *Science of the Total Environment*, 650, 2051–2062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.115>

Dagnachew, M., Kebede, A., Moges, A., & Abebe, A. (2020). *Effects of Climate Variability on Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Gojeb River Catchment, Omo-Gibe Basin, Ethiopia* [Efectos de la variabilidad climática en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el área de captación del Río Gojeb, cuenca Omo-Gibe, Etiopia]. *Advances in Meteorology*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8263246>

Derguy, M. (2017). Clasificación Ecológica Para La República Argentina a Partir Del Modelo De Zonas De Vida De Holdridge: Mapeo, Caracterización Y Tendencias De Cambio. *Cartografías Del Sur. Revista de Ciencias, Artes y Tecnología*, 6, 140–151. <https://doi.org/10.35428/cds.v0i6.94>

Gao, J., Jiao, K., & Wu, S. (2019). *Investigating the spatially heterogeneous relationships between climate factors and NDVI in China during 1982 to 2013* [Investigación de la relación espacial heterogénea entre factores climáticos y el NDVI en China de 1982 al 2013]. *Journal of Geographical Sciences*, 29(10), 1597–1609. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1682-2>

Gao, W., Zheng, C., Liu, X., Lu, Y., Chen, Y., Wei, Y., & Ma, Y. (2022). *NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land, China* [Dinámica de la vegetación basada en el NDVI y su respuesta al cambio climático y actividades humanas de 1982 a 2020: un caso de estudio en el desierto Mu Us, China]. *Ecological Indicators*, 137(November 2021), 108745. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108745>

- Gao, Y., Skutsch, M., Gálvez, J., & Ghilardi, A. (2020). *Remote sensing of forest degradation: a review* [Detección remota de la degradación forestal: una reseña]. *Environmental Research Letters*, 15(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaad7>
- Gebrechorkos, S., Hülsmann, S., & Bernhofer, C. (2020). *Analysis of climate variability and droughts in East Africa using high resolution climate data products* [Análisis de la variabilidad climática y las sequías en el este de África utilizando información climática de alta resolución]. *Global and Planetary Change*, 186(September 2019), 103130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103130>
- Giovas, R., Tassopoulos, D., Kalivas, D., Lougkos, N., & Priovolou, A. (2021). *Remote sensing vegetation indices in viticulture: A critical review* [Teledetección para índices de la vegetación en la viticultura: una revisión crítica]. *Agriculture (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/agriculture11050457>
- Jandl, R., Spathelf, P., Bolte, A., & Prescott, C. (2019). *Forest adaptation to climate change—is non-management an option?* [Adaptación de los bosques al cambio climático, es la falta de manejo una opción?]. *Annals of Forest Science*, 76(2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0827-x>
- Lambert, J., Denux, J, Verbesselt, J., Balent, G., & Cheret, V. (2015). *Detecting clear-cuts and decreases in forest vitality using MODIS NDVI time series* [Detección de claros y pérdida de vitalidad en el bosque utilizando series temporales de NDVI de un MODIS]. *Remote Sensing*, 7(4), 3588–3612. <https://doi.org/10.3390/rs70403588>

Li, P., Wang, J., Liu, M., Xue, Z., & Bagherzadeh, A. (2021). *Spatio temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015* [Variación espacio temporal de las características del NDVI y su respuesta al clima en meseta Loess de 1985 al 2015]. *Catena*, 203(June 2020), 105331. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105331>

Lin, X., Niu, J., Berndtsson, R., Yu, X., Zhang, L., & Chen, X. (2020). *Ndvi dynamics and its response to climate change and reforestation in Northern China* [Dinámica del NDVI y su respuesta al cambio climática y la reforestación en el norte de China]. *Remote Sensing*, 12(24), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs12244138>

Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (2020). *Determinación de la Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra a escala 1:50000 de la República de Guatemala*, año 2020 (Vol. 21, Issue 1). <https://www.maga.gob.gt/download/Cobertura-vegetal-uso-de-la-tierra-21.pdf>

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2016). *Informe Ambiental del Estado de Guatemala*. <informeambiental2016.pdf> (samuels.gt)

Marroquín, G., & Gómez, R. (2019). Antecedentes y contexto del cambio climático en Guatemala. *Primer Reporte de Evaluación Del Conocimiento Sobre Cambio Climático En Guatemala*, 2–19. <1RepCCGuaCap1.pdf> (sgccc.org.gt)

Measho, S., Chen, B., Trisurat, Y., Pellikka, P., Guo, L., Arunyawat, S., Tuankruea, V., Ogbazghi, W., & Yemane, T. (2019). *Spatio temporal*

analysis of vegetation dynamics as a response to climate variability and drought patterns in the Semiarid Region, Eritrea [Análisis espaciotemporal de la dinámica de la vegetación como una respuesta a la variabilidad climática y los patrones de sequía en la región semiárida de Eritrea]. *Remote Sensing*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/RS11060724>

Mokhena, T., Mochane, M., Tshwafo, M., Liganiso, L., Thekiso, O., & Songca, S. (2016). *Perspective Chapter: Forest degradation under Global Climate Change* [Capítulo de perspectiva: degradación forestal bajo el cambio climático global]. *Intech*, 225–240. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>

Nanzad, L., Zhang, J., Tuvdendorj, B., Nabil, M., Zhang, S., & Bai, Y. (2019). *NDVI anomaly for drought monitoring and its correlation with climate factors over Mongolia from 2000 to 2016* [Anomalía del NDVI para monitorear la sequía y su correlación con factores climáticos en Mongolia de 2000 a 2016]. *Journal of Arid Environments*, 164(May 2018), 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.01.019>

Oliveira, S., Souza, A., Abreu, M., Júnior, J., & Cavazzana, G. (2020). *SPATIOTEMPORAL CHARACTERIZATION OF PRECIPITATION IN MATO GROSSO DO SUL: RAINFALL DISTRIBUTION AND ANOMALY (RAI) ANALYSIS FOR CLIMATE PHENOMENA* [Caracterización espaciotemporal de la precipitación en Mato Grosso del sur: distribución de la precipitación y análisis su anomalía (RAI) para el fenómeno climático]. *Revista Brasileira de climatología*, 27, 181–201. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.69407>

Pallarés, P., Caicedo, J., Belda, S., De Grave, C., Burriel, H., Moreno, J., & Verrelst, J. (2019). *Quantifying the robustness of vegetation indices through global sensitivity analysis of homogeneous and forest leaf-canopy radiative transfer models* [Cuantificación de la robustez de los índices de la vegetación a través de un análisis de sensibilidad global de la homogeneidad y modelos de transferencia radiativa del follaje arbóreo]. *Remote Sensing*, 11(20), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs11202418>

Pérez, G., Monzón, J., Ibarra, R., & Cabrera, G. (2018). Ecosistemas de Guatemala basado en el Sistema de clasificación de Zonas de Vida. <http://www.infoiarna.org.gt/wp-content/uploads/2019/02/Ecosistemas-de-Guatemala-final.pdf>

Prăvălie, R., Sîrodoev, I., Nita, I., Patriche, C., Dumitraşcu, M., Roşca, B., Tişcovschi, A., Bandoc, G., Săvulescu, I., Mănoiu, V., & Birsan, M. (2022). *NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018* [Dinámica ecológica basada en el NDVI de la vegetación forestal y su relación con el cambio climático en Rumania durante 1987-2018]. *Ecological Indicators*, 136(August 2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108629>

Radachowsky, J., Ramos, V., McNab, R., Baur, E., & Kazakov, N. (2012). *Forest concessions in the Maya Biosphere Reserve, Guatemala: A decade later* [Concesiones forestales en la Reserva de la Biosfera Maya: una década después]. *Forest Ecology and Management*, 268, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.043>

- Rodas, R., Kent, J., Ammour, T., & Gálvez, J. (2014). *Challenges and opportunities of sustainable forest management through community forestry concessions in the Maya Biosphere Reserve* [Desafíos y oportunidades del manejo sostenible de los bosques a través de concesiones forestales comunitarias en el Reserva de la Biosfera Maya]. *Forests under Pressure: Local Responses to Global Issues*, 113–129. <http://www.iufro.org/.../ws32.pdf>
- Rumann, S., Kemp, B., Higuera, P., Harvey, B., Rother, M., Donato, D., Morgan, P., & Veblen, T. (2018). *Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change* [Evidencia del decrecimiento de la resiliencia de los bosques a los incendios bajo el climático]. *Ecology Letters*, 21(2), 243–252. <https://doi.org/10.1111/ele.12889>
- Sein, Z., Zhi, X., Ogou, F., Nooni, I., Lim, K., & Gnitou, G. (2021). *Spatio temporal analysis of drought variability in Myanmar based on the standardized precipitation evapotranspiration index (Spei) and its impact on crop production* [Análisis espaciotemporal de la variabilidad de la sequía en Myanmar, basado en el índice de precipitación y evapotranspiración estandarizado (Spei) y su impacto en la productividad de los cultivos]. *Agronomy*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy11091691>
- Sonali, P., & Kumar, D. (2013). *Review of trend detection methods and their application to detect temperature changes in India* [Revisión de los métodos para la detección de tendencias y su aplicación para identificar cambios en la temperatura en India]. *Journal of Hydrology*, 476, 212–227. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.034>

Sonali, P., Prasanna, J., Atre, A., Pande, C., & Gorantiwar, S. (2021). *Application of NDVI in Vegetation Monitoring using Sentinel -2 Data for Shrirampur Region of Maharashtra* [Aplicación del NDVI en el monitoreo de la vegetación utilizando datos de Sentinel-2 en Shrirampu región de Maharashtra]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 10(01), 799–806. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1001.098>

Spadoni, G., Cavalli, A., Congedo, L., & Munafò, M. (2020). *Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography* [Análisis del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en series multitemporales para la elaboración de cartografía forestal]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20(August). <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100419>

United State Agency for International Development (2021). *USAID GUATEMALA BIODIVERSITY PROJECT Final Report* [USAID Guatemala, proyecto de biodiversidad, reporte final]. [Final Report: USAID Guatemala Biodiversity Project - Chemonics International](#)

Wang et al. (2020). *Re-evaluation of the Power of the Mann Kendall Test for Detecting Monotonic Trends in Hydrometeorological Time Series* [Re evaluación de la potencia de la prueba de Mann Kendall para detectar tendencias monotónicas en series temporales hidrometeorológicas] . *Frontiers in Earth Science*, 8(February), 1–12. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00014>

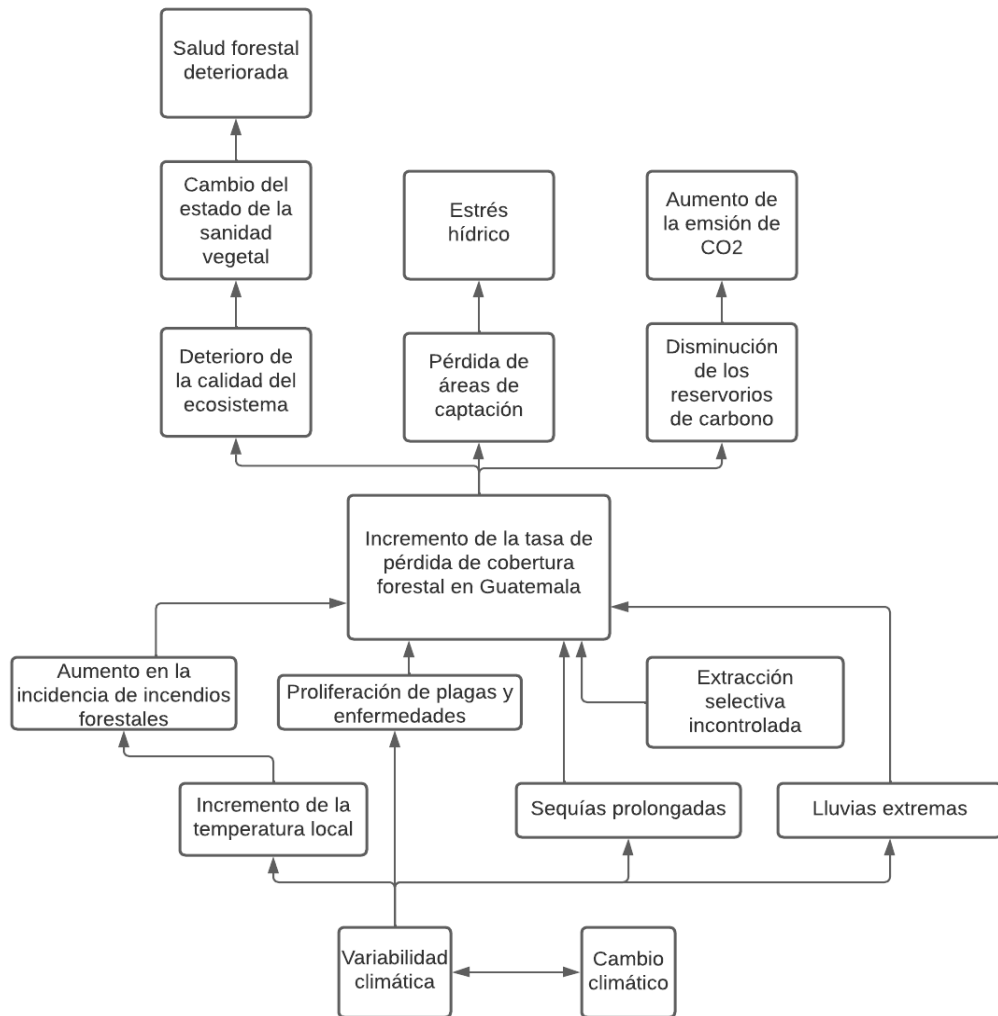
- You, G., Liu, B., Zou, C., Li, H., McKenzie, S., He, Y., Gao, J., Jia, X., Arain, M., Wang, S., Wang, Z., Xia, X., & Xu, W. (2021). *Sensitivity of vegetation dynamics to climate variability in a forest-steppe transition ecozone, north-eastern Inner Mongolia, China* [Sensibilidad de la dinámica de la vegetación a la variabilidad climática en la zona de transición de la estepa forestal, interior de Mongolia noreste, China]. *Ecological Indicators*, 120(September 2020), 106833. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106833>
- Zhang, W., Wang, L., Xiang, F., Qin, W., & Jiang, W. (2020). *Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China* [Dinámica de la vegetación y su relación con el cambio climático a múltiples escalas de tiempo en el Río Yangtze y la cuenca del Río Amarillo, China]. *Ecological Indicators*, 110(September 2019), 105892. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105892>
- Zhao, Y., Feng, Q., & Lu, A. (2021). *Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its driving factors in the Guanzhong Basin, NW China* [Variación espaciotemporal de la cobertura vegetal y sus factores determinantes en el Cuenca Guanzhongm, noroeste de China]. *Ecological Informatics*, 64(July), 101371. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101371>
- Zuo, D., Han, Y., Xu, Z., Li, P., Ban, C., Sun, W., Pang, B., Peng, D., Kan, G., Zhang, R., & Yang, H. (2021). *Time-lag effects of climatic change and drought on vegetation dynamics in an alpine river basin of the Tibet Plateau, China* [Efecto de los periodos de retardo del cambio climático y la sequía en la dinámica de la vegetación en la cuenca del río alpino]

en la meseta del Tíbet, China]. *Journal of Hydrology*, 600(January), 126532. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126532>

APÉNDICES

Apéndice 1.

Árbol de problemas



Nota. Se presentan las causas y efectos asociados a la problemática central. Elaboración propia 2023, realizado con Lucidchart.

Apéndice 2.

Matriz de coherencia

Preguntas de investigación	Objetivos	Variables	Metodología
¿Cuál es el grado de influencia de la variabilidad climática en el estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022?	Determinar el grado de influencia de la variabilidad climática en el estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022.		
¿Cuál es la tendencia espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022?	Estimar la tendencia espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022.	Tendencia espaciotemporal (Z) NDVI (estado de la sanidad vegetal)	Variación promedio quinquenal a interdecadal. Estimación de tendencias con Mann Kendall. Análisis de significancia
¿Qué tipo de anomalías climáticas se registran en el área de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022?	Clasificar las anomalías climáticas que se registran en el área de los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022.	Tipo de anomalía climática (+/-) Precipitación Temperatura	Cálculo de anomalía estandarizada. Cálculo del índice de anomalía de precipitación. Clasificación
¿Cuál es la relación espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal y la variabilidad climática en los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022?	Evaluar la relación espaciotemporal del estado de la sanidad vegetal y la variabilidad climática en los bosques de las concesiones forestales de Guatemala durante el periodo 1990-2022.	R (relación espaciotemporal) NDVI Precipitación Temperatura	Cálculo de anomalía del NDVI Evaluación de correlación entre anomalías Análisis de periodos de retardo Análisis de significancia de la correlación

Nota. Se describe la orientación y sentido de la investigación. Elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1.

Métodos con sensores remotos para evaluar la condición de los bosques

Tipo de perturbación y escala	Tipo de sensor recomendado para estimar el área de degradación	Sensores (modelo, resolución espacial/ año de lanzamiento)	Tipo de aproximación para estimar las emisiones de la degradación
Tala, incendios, cambios en el cultivo, a pequeña escala (<1 ha)	Muy alta (<5 m) o alta resolución (5-10m) óptica, banda X del radar (SAR)	GeoEye (Pan 0.41 m, Ms 1.65 m/2008) WorldView 3 (Pan 0.31, Ms 1.24 m/2014) SPOT-6/7 (Pan 2 m, Ms 8 m/2012/2014) RapidEye (5 m/2009) TanDEM-X (3D DEM: 12 m/2011) TerraSAR-X (SL 1.7–3.5 m, SM 3 m/2007)	Muestreo a nivel suelo a partir de informaciones de: Parcelas permanentes.
Tala, incendios, cambios en el cultivo, a gran escala (>1 ha)	Resolución óptica moderada (10-100 m), bandas L-, C- y X del radar (SAR)	Sentinel-2 (10 m, 20 m/2015) Landsat TM, ETM +, OLI (30 m/1984, 1999, 2013) CBERS-4 (5–80 m/2014) ALOS-2 PALSAR (FBD: 25 m/2014) Sentinel-1 (SP&DP 20 m/2015) TerraSAR-X (SLC 25 m/2007)	Muestreos de campo de bosques perturbados vs no perturbados. Información LiDAR.
Extracción selectiva (fines energéticos) y sobre pastoreo, por debajo del follaje	No detectada por información óptica de radar (SAR), posiblemente con la banda C- y L-	Envisat ASAR (IM 30 m/2002) ALOS-2 PALSAR-2 (FBD 2 m/2014)	Combinación de sensores remotos e información a nivel de suelo.
Daños ocasionados por vientos, huracanes, sequías, defoliación de insectos, a gran escala	Resolución óptica de modera a baja (>100 m), banda C- y L- del radar (SAR)	Sentinel-2 (10 m, 20 m/2015) Landsat TM, ETM +, OLI (30 m/1984, 1999, 2013) CBERS-4 (5–80 m/2014) MODIS (250 m, 500 m, 1000 m/2000) ALOS-2 PALSAR-2 (FDB 2 m/2014) Sentinel-1 (SP, DP 20 m/2015)	Biomasa por encima del suelo (AGB) de datos SAR. Modelos AGB basados en información óptica de alta resolución.

Nota. Obtenido de Gao, W., Zheng, C., Liu, X., Lu, Y., Chen, Y., Wei, Y., & Ma, Y. (2022). *NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land, China* [Dinámica de la vegetación basada en el NDVI y su respuesta al cambio climático y actividades humanas de 1982 al 2020: un caso de estudio en el desierto Mu Us, China]. *Ecological Indicators*, 137(November 2021), 108745. p. 13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108745>