



**Departamento de
Ambiente y Desarrollo**

Informe final de investigación:

“Resiliencia del ecosistema de *Pinus* al ataque del gorgojo descortezador, en función de la densidad y su correlación con otras variables biofisiográficas”

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	4
2. PRODUCTO 1 – ARTÍCULO CIENTÍFICO	5
2.1. RESILIENCIA DEL ECOSISTEMA DE PINO AL ATAQUE DEL GORGOJO DESCORTEZADOR EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD Y SU CORRELACIÓN CON OTRAS VARIABLES BIOFISIOGRÁFICAS.....	5
2.1.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.1.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
2.1.3. RESULTADOS.....	12
2.1.4. CONCLUSIONES	23
2.1.5. RECOMENDACIONES	24
2.1.6. BIBLIOGRAFÍA	24
3. PRODUCTO 2 - DIRECTRICES PARA LA APLICACIÓN DE ACCIONES CORRECTIVAS E INDUCCIÓN DE RESILIENCIA EN BOSQUES AFECTADOS POR DIFERENTES DENSIDADES.....	28
3.1. DIRECTRICES PARA LA APLICACIÓN DE ACCIONES CORRECTIVAS E INDUCCIÓN DE RESILIENCIA EN BOSQUES AFECTADOS POR DIFERENTES DENSIDADES.....	28
3.1.1. INTRODUCCIÓN.....	28
4. PRODUCTO 3. METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE RESILIENCIA DEL BOSQUE DE PINO	37
4.1. METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE RESILIENCIA DEL BOSQUE DE PINO	37
4.1.1. INTRODUCCIÓN.....	37
4.1.2. METODOLOGÍA	37
5. PRODUCTO 4: MODELO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE RESILIENCIA DEL BOSQUE DE PINO ANTE EL ATAQUE DE LA PLAGA DEL GORGOJO EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD Y COMPOSICIÓN FLORÍSTICA.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de los puntos muestreados correspondiente a áreas afectadas por la plaga del gorgojo descortezador.9

Figura 2. Valores medios de los índices de vegetación para las parcelas de muestreo, Etapa 1 = Antes del ataque del gorgojo (2012 y 2013), Etapa 2 = Durante el ataque del gorgojo (2014 al 2019) y Etapa 3 = Después del ataque del gorgojo (2020 al 2023).....14

Figura 3. Línea de tiempo de la media de los índices de vegetación (NDVI, ARVI y GCI) para los puntos afectados por la plaga del gorgojo; la línea roja, azul y verde punteada representan los 3 eventos registrados de afectación en el lapso evaluado.....15

Figura 4. Precipitación media mensual para los puntos muestreados, durante el periodo del año 2012 al 2023.....15

Figura 5. Media de los índices de vegetación para un parche que corresponden a las parcelas de muestreo (parche No. 9). A=media del año 2014, inicio del tercer mayor registro de brotes desde 1982, B= media del año 2023, final del estudio.....16

Figura 6. Diferencia de la media de los índices de vegetación (NDVI, ARVI y GCI) para los puntos afectados por la plaga del gorgojo a partir del año 2012 al 2023.....17

Figura 7. Análisis discriminante para la categorización de los puntos de muestreo de acuerdo al tipo de parche en función de las variables utilizadas en el estudio.18

Figura 8. Sensibilidad y especificidad por tipo de parche para el modelo de análisis discriminante.....18

Figura 9. Media de los índices de vegetación como respuesta a la salud actual del bosque de pino en parcelas de muestreo para sitios afectados por la plaga del gorgojo y sitios no afectados, (A=sitios afectados y T=sitios no afectados).....19

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Categorías de los tipos de parches utilizados en el estudio.9

Cuadro 2. Variables utilizadas en el análisis de correlación del estudio.....10

Cuadro 3. Correlación de las variables evaluadas en relación con la línea de tiempo de la media de los índices de vegetación para el periodo de 2012 al 2023.13

Cuadro 4. Nivel de recuperación de la media de los índices de vegetación en el año 2023 referentes al año 2012.....16

Cuadro 5. ANOVA para las medias de los valores de Índices de Vegetación en los sitios afectados y los sitios testigos.18

Cuadro 6. ANOVA para los criterios dasométricos sobre el impacto del gorgojo descortezador en los boques de pino en Honduras (n=54).19

Cuadro 7. Análisis de las diferencias de medias de las áreas basales y el número de individuos entre sitios afectados, no afectados y la forma del parche.....20

Cuadro 8. Análisis de las diferencias de medias del total de árboles de todas las especies y solamente la especie de pino, entre sitios afectados, no afectados y la forma del parche.22

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El estudio de la resiliencia de los ecosistemas forestales es crucial para comprender cómo estos entornos naturales responden y se recuperan de perturbaciones externas. En este contexto, la presente investigación se centra en el ecosistema de *Pinus* y su capacidad de resistencia y recuperación frente al ataque del gorgojo descortezador (*Dendroctonus spp.*), un insecto que ha demostrado ser un agente de perturbación significativo en bosques de pinos en Honduras. La resiliencia de estos ecosistemas no solo depende de la densidad de los árboles, sino también de una serie de variables biofisiográficas que interactúan de manera compleja.

Como productos finales de este trabajo, en el marco de la Propuesta Técnica según el Oficio AEPAS-H/SDE No. 111-2021; **Resiliencia del ecosistema de *Pinus* al ataque del gorgojo descortezador, en función de la densidad y su correlación con otras variables biofisiográficas**” como definición de la capacidad de resiliencia de los bosques de pino de Honduras; se desarrollaron:

Documento final de la investigación, en formato de artículo científico

Documento: Directrices para la Aplicación de Acciones Correctivas e Inducción de Resiliencia en Bosques Afectados por Diferentes Densidades

El objetivo general de esta investigación es evaluar la capacidad de recuperación del bosque de pino después de perturbaciones originadas por el gorgojo descortezador del pino. Como objetivos específicos se plantean los siguiente: definir los principales factores biofísicos que afectan la capacidad de recuperación de los bosques de pino a perturbaciones originadas por el gorgojo descortezador del pino, determinar los principales factores socioeconómicos que afectan la capacidad de recuperación de los bosques de pino ante perturbaciones originadas por el gorgojo descortezador del pino y desarrollar un modelo para evaluar la capacidad de recuperación de los bosques ante perturbaciones generadas por el gorgojo descortezador del pino.

En resumen, este informe presenta un análisis detallado de la resiliencia del ecosistema de *Pinus*, proporcionando una visión integral de las variables que influyen en su respuesta ante el ataque del gorgojo descortezador. Los hallazgos de esta investigación ofrecen una base sólida para el desarrollo de estrategias de manejo forestal que promuevan la sostenibilidad y la salud de estos importantes ecosistemas para Honduras.

Como institución ejecutora, Zamorano es una universidad internacional especializada en temas agrícolas y ambientales. El Departamento de Ambiente y Desarrollo, encargado de la investigación, se especializa en la formación de jóvenes en áreas como la gestión de los recursos naturales y forestales, y el desarrollo sostenible, entre otras. En el área de bosques, ha enfocado sus esfuerzos de educación e investigación en el manejo de bosques naturales y plantaciones de alto valor económico.

Como parte de sus estrategias para la gestión de las áreas forestales, la Unidad Forestal se encarga del cuidado y manejo de más de 2000 hectáreas de terrenos forestales de la institución. Además de la Unidad Forestal, el Departamento de Ambiente y Desarrollo cuenta con el herbario Paul C. Stanley, el cual fue un apoyo fundamental para el desarrollo de la investigación, ya que se encargó de la correcta identificación de las plantas colectadas.

A continuación, se desglosa cada uno de los productos desarrollados como informe final

2. PRODUCTO 1 – ARTÍCULO CIENTÍFICO

2.1. RESILIENCIA DEL ECOSISTEMA DE PINO AL ATAQUE DEL GORGOJO DESCORTEZADOR EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD Y SU CORRELACIÓN CON OTRAS VARIABLES BIOFISIOGRÁFICAS.

Flores, J.C; Trejos, B; Granadino, M; Jut Solórzano, J. C.

2.1.1. INTRODUCCIÓN

Los bosques de pino en Honduras se enfrentan a amenazas latentes y disruptivas, entre ellas eventos climáticos extremos, avance de la frontera agrícola y una de las que mayor protagonismo ha tomado en la última década ha sido el ataque del gorgojo descortezador (*Dendroctonus sp*) (Gomez, Sathyapala, & Hulcr, 2020), esta ha provocado la necesidad de una evaluación técnica exhaustiva. Este coleóptero, reconocido por su capacidad para debilitar la corteza de los árboles de pino, plantea desafíos significativos para la sostenibilidad de estos ecosistemas (Billings, y otros, 2004).

El bosque de pino es una asociación natural que se caracteriza por la dominancia de especies del género *Pinus*. A las especies del género *Pinus* generalmente se le asocian especies latifoliadas, dentro de las cuales sobresalen las especies del género *Quercus*. Por ello, a esta formación vegetal normalmente se le llama bosques de pino-encino. Este tipo de bosque se extiende desde el suroeste de Estados Unidos hasta Nicaragua (Mora Donjuan & Alanís Rodríguez, 2016).

Al estar dominado por una especie pionera, el ecosistema de pino-encino requiere para su existencia de la ocurrencia de perturbaciones. Estas perturbaciones generan los espacios necesarios para que el pino pueda regenerarse. Se ha documentado que la perturbación más común en estos bosques son los incendios, por lo cual las especies han evolucionado para poder resistirlos (Mora Donjuan & Alanís Rodríguez, 2016). Por otro lado, aunque es una de las principales causas de pérdida de la cobertura forestal, las perturbaciones en el bosque de pino-encino debido a la agricultura y ganadería son las menos documentadas y no se presenta al gorgojo descortezador como un factor de disturbio en los bosques de pino-encino

(Mora Donjuan & Alanís Rodríguez, 2016). A pesar de todos estos factores los bosques de Centroamérica presentan una mayor resiliencia que los de Asia o Sudamérica (Cole, Bhagwat, & Willis, 2014).

Si bien los bosques de pino-encino requieren de perturbaciones para mantener sus procesos ecológicos, no siempre se pueden recuperar después de perturbaciones graves y prolongadas. Se reporta que existen umbrales de recuperación para las poblaciones de las distintas especies y para los procesos dentro de los ecosistemas (Mora Donjuan & Alanís Rodríguez, 2016). El nivel de severidad del agente que causa el disturbio afecta la capacidad de recuperación del bosque. Por ejemplo, los bosques de pino se recuperan fácilmente de incendios leves y moderados. En cambio, cuando los incendios son severos, se tiende a cambiar a una vegetación más arbustiva (Gonzales-De Vega, De las Heras, & Moya, 2016; Adámek, Hadincová, & Wild, 2016; Andrus, Hart, & Veblen, 2020; Mora Donjuan & Alanís Rodríguez, 2016).

La capacidad del bosque pino-encino para recuperarse de las perturbaciones es lo que se entiende como resiliencia. El término resiliencia lo acuñó Holling en 1973 y se refiere a cómo los ecosistemas se auto mantienen y persisten frente a perturbaciones y cambios. Se considera que es la capacidad del ecosistema de regresar a su estado original después de sufrir una perturbación, manteniendo sus características esenciales de composición taxonómica, estructura, funciones ecosistémicas y tasas de procesos (Hedo, et al., 2013; Lloret, Keeling, & Sala, 2011; DeRose & Long, 2014; Mora Donjuan & Alanís Rodríguez, 2016). Se define como resiliencia en el largo plazo cuando la capacidad regenerativa de los bosques compensa la mortalidad (Xu, et al., 2016).

El concepto de resiliencia incluye tres características: 1) la cantidad de cambio o transformación que un sistema complejo puede soportar manteniendo las mismas propiedades funcionales y estructurales; 2) el grado en el que el sistema es capaz de autoorganizarse; y 3) la habilidad del sistema complejo para desarrollar o incrementar la capacidad de aprender, innovar y adaptarse (Mora Donjuan & Alanís Rodríguez, 2016). La resiliencia está asociada a la dinámica del ecosistema, por lo que no hay una forma de cuantificarlo de manera normalizada o estandarizada (Hedo, et al., 2013).

Es importante diferenciar los conceptos de “ecological resilience” de “engineering resilience”, los cuales se refieren a dos enfoques para analizar la resiliencia. En la literatura en español, no se encuentran referencias al término “engineering resilience”, el cual se relaciona con la capacidad de un sistema de regresar a su estructura previa a un disturbio. Por otro lado, el concepto de “ecological resilience” se documenta en la literatura en español como resiliencia ecológica y se refiere a la capacidad del sistema para absorber los impactos y mantener su funcionalidad, aun cambiando su estructura y composición (Convention on Biological Diversity; UNEP, 2009; Dhar, Parrott, & Hawkins, 2016).

Los disturbios naturales pueden servir como un mecanismo para diversificar el sistema, promoviendo bosques más resilientes (Dhar, Parrott, & Hawkins, 2016). Sin embargo, la reducción en los ciclos de reincidencia de los fenómenos que causan perturbaciones en los bosques puede reducir la capacidad de estos a reponerse a la perturbación. Esto se documentó para bosque de pino con los incendios forestales (Turner, Braziunas, Hansen, & Harvey, 2019). Cuando estas perturbaciones permiten la recuperación del sistema son un factor que mejora la resiliencia. Se ha evidenciado que la reintroducción del fuego de forma controlada en bosques en los cuales se había excluido su uso ayudó a aumentar la resiliencia en los bosques de pino, ya que reduce el riesgo de incendios intensos que pueden afectar severamente al bosque. La exclusión del fuego en el bosque de pino incrementa la densidad, altera la composición del bosque y eleva la cantidad de combustible (Larson, Travis Belote, Cansler, Parks, & Dietz, 2013).

Se ha documentado que los episodios de plaga del gorgojo juegan un rol importante en los procesos ecológicos que ocurren en el bosque de pino, favorecen el desarrollo de algunas especies y contribuyen a regenerar el bosque (Dhar, Parrott, & Hawkins, 2016). Aunque se puede pensar que los ataques del gorgojo destruyen el bosque de pino, los árboles remanentes que se mantienen después del ataque permiten la recuperación del bosque (Dhar, Parrott, & Hawkins, 2016). Cuando no quedan árboles remanentes, la nueva estructura que se desarrolla tiende a ser más simple, con menos diversidad de especies (Dhar, Parrott, & Hawkins, 2016).

Comprender cuáles son las características que hacen a un bosque resiliente es importante para definir las prácticas silviculturales que se pueden aplicar (DeRose & Long, 2014). Se argumenta que una de las razones por las cuales el gorgojo sigue siendo una plaga en Canadá es por las políticas forestales que han llevado a establecer bosques coetáneos y homogéneos en su estructura, lo cual los hace menos resistentes y resilientes a los brotes del gorgojo (Dhar, Parrott, & Hawkins, 2016).

Otro factor que se ha estudiado bastante en la literatura es el efecto de la densidad de los árboles en el bosque sobre la resiliencia. Se ha documentado que el raleo o manejo de la densidad del bosque es una alternativa para mejorar la resiliencia de los bosques, así como también las quemadas prescritas (Magruder, Chhin, Palik, & Bradford, 2013; Hood, Baker, & Sala, 2016; Fettig & McKelvey, 2014; Zhang, Finley, Johnson, & Ritchie, 2019). Sin embargo, en el largo plazo el manejo de la densidad no tiene efecto en la resiliencia y, más específicamente, a disturbios provocados por el gorgojo descortezador (Morris, Buonanduci, Agne, Bataglia, & Harvey, 2021).

Establecer la intensidad de la perturbación y la composición florística posterior al evento es fundamental para determinar la resiliencia del bosque (Schmitt, et al., 2019). Entre más grandes son los claros generados y menor la cantidad de árboles remanentes de pino, mayor es la probabilidad de que la velocidad de recuperación del bosque sea más lenta. Se ha documentado que, al tener parches de bosque más pequeños, se reduce la resiliencia (Xu, et al., 2016).

Otro factor que afecta a los bosques es el cambio climático. La variación en los ciclos de precipitación y aumento de temperatura está reduciendo la resiliencia de los bosques (Xu, et al., 2016). Este ha sido uno de los factores que se asocia a la intensidad del último brote de gorgojo experimentado en Honduras, en donde se combinaron varios años con déficit de lluvia, lo cual pudo haber debilitado la resistencia del bosque a la plaga. Varios estudios han documentado los efectos del cambio climático en los bosques y específicamente el efecto de este en los patrones de diseminación de insectos forestales (Xu, et al., 2016; Hedo, et al., 2013; Jha, Das, Sharma, Hazra, & Goyal, 2019; Deepa, Roques, & Battisti, 2018).

Por todo lo anterior, es importante estudiar la capacidad de recuperación de los bosques de pino en Honduras, ya que continuaremos afrontando todos los factores mencionados que perturban la estabilidad del bosque. Los incendios forestales, las presiones por conversión del bosque a actividades agrícolas y el gorgojo descortezador seguirán presionando al bosque, por lo cual es importante establecer mecanismos y políticas que ayuden a su recuperación. Sin embargo, para esto se debe conocer cómo los bosques responden de forma natural ante estos fenómenos.

La exploración de variables biofísicas, como la diversidad de especies, la estructura etaria del bosque, el diámetro y la altura además de información obtenida de bases de datos satelitales, constituye el núcleo de este análisis. Factores edafoclimáticos, incluyendo condiciones climáticas y propiedades del suelo, se integran para proporcionar un panorama comprehensivo de los determinantes que influyen en la respuesta del ecosistema a la plaga.

Este enfoque técnico se apoya en métodos analíticos avanzados, como análisis de regresión y modelado predictivo, para identificar patrones y relaciones causales en los datos recolectados. La dimensión socioeconómica es explorada a través de la evaluación de la participación de las comunidades forestales como practicas sostenibles en el bosque para la gestión y conservación, reconociendo su rol crítico en la formulación de estrategias de adaptación.

El presente estudio se propone abordar esta problemática desde un enfoque espaciotemporal que incorpore variables biofísicas, edafoclimáticas y socioeconómicas, con el objetivo de discernir la resiliencia del bosque frente a la persistente presión del gorgojo descortezador. El objetivo principal de esta investigación pretende abarcar más allá de la comprensión sobre la relación entre el gorgojo descortezador y los bosques de pino, sino también en el suministro de fundamentos científicos para la delineación de estrategias de manejo forestal que salvaguarden la resiliencia de estos ecosistemas en el contexto hondureño.

2.1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.2.1. Área de estudio

El área de estudio comprende zonas con diversidad de características climáticas, paisajísticas, topográficas además de estar distribuidas aleatoriamente en el territorio de Honduras, como se observa en la figura 1.

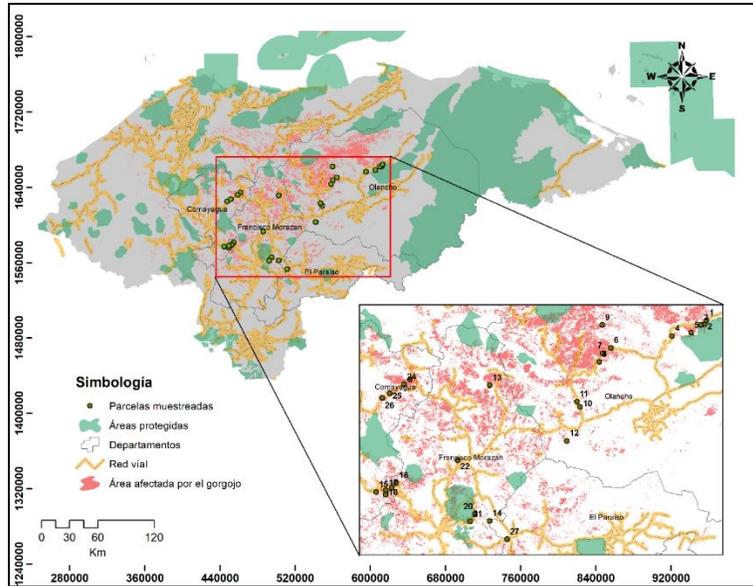


Figura 1. Localización de los puntos muestreados correspondiente a áreas afectadas por la plaga del gorgojo descortezador.

2.1.2.2. Diseño de la investigación y definición de sitios

La naturaleza de la presente investigación es exploratoria cuantitativa correlacional, la cual se basa en variables paisajísticas, bioclimáticas, fenológicas, topográficas y socioeconómicas del entorno a los sitios de muestreo.

Para identificar los sitios de muestreo, se examinaron los parches de bosque de pino afectados por la plaga del gorgojo registrados en los años 2014, 2017 y 2019. Las actualizaciones pertinentes fueron proporcionadas por el personal del Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF), complementadas con archivos de capas depuradas facilitadas por el Banco Interamericano de Desarrollo BID.

La evaluación del tamaño y la forma de los parches se realizó mediante un índice de compacidad adaptado (Cañibano & Gandini, 2018). Estos parches se categorizaron en términos de forma, dividiéndolos en grupos de redondos, ligeramente alargados o muy alargados, considerando también sus dimensiones para clasificarlos como pequeños, medianos o grandes utilizando un análisis Cluster de acuerdo a sus características topográficas.

Para la generación de los clústeres se aplicó el algoritmo K-means a los polígonos correspondientes a los sitios afectados por la plaga del gorgojo, el cual fue actualizado con las capas correspondientes a los sitios identificados al 2019, además de la capa depurada por el BID (Banco Interamericano de Desarrollo), ver cuadro 4.

Cuadro 1. Categorías de los tipos de parches utilizados en el estudio.

Código	Tamaño	Forma	Tipo de parche
1	Pequeño	Moderadamente circular	Pequeño moderadamente circular
2	Mediano	Moderadamente circular	Mediano moderadamente circular
3	Grande	Moderadamente circular	Grande moderadamente circular
4	Pequeño	Alargado	Pequeño alargado
5	Mediano	Alargado	Mediano alargado
6	Grande	Alargado	Grande alargado
7	Pequeño	Muy alargado	Pequeño muy alargado
8	Mediano	Muy alargado	Mediano muy alargado
9	Grande	Muy alargado	Grande muy alargado

Para garantizar una metodología estandarizada, se replicaron las 27 muestras para contar con un testigo, siguiendo el método pareado de muestreo. En conjunto, se muestrearon 54 puntos, 27 correspondientes a áreas afectadas y 27 que funcionaron como testigos (control).

2.1.2.3. Métricas evaluadas

Para los diferentes análisis realizados se utilizaron variables bioclimáticas, topográficas, paisajísticas, fenológicas y socioeconómicas las cuales se obtuvieron de diferentes fuentes como se detallan en el cuadro 1.

Cuadro 2. Variables utilizadas en el análisis de correlación del estudio.

No.	Variable	Fuente
1	Índices de vegetación	Obtenido de las imágenes Landsat disponibles en el repositorio del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)
2	Temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación.	Obtenidas del repositorio de TerraClim administrado por Laboratorio de Ciencias del Clima y Medio Ambiente (CSE Lab) de la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) (Abatzoglou, Dobrowski, Parks, & Hegewisch, 2018), corregidas y complementadas con datos proporcionados por

		la Comisión Permanente de Contingencias -COPECO-.
3	Incendios detectados	Obtenidos de la plataforma FIRMS (Fire Information for Resource Management System), administrado por la NASA (National Aeronautics and Space Administration, 2023).
4	Distancia a poblados	Obtenida del shapefile del archivo correspondiente a Caseríos de Honduras, SINIT.
5	Forma y tamaño	Calculados a partir del shapefile correspondiente a las áreas de afectación de la plaga del gorgojo.
6	Distancia a ríos	Calculado en campo con el uso de hojas cartográficas.
7	Pendiente	Calculada en campo con un clinómetro
8	Tamaño y forma del parche	Estos se calcularon de acuerdo a metodología Coeficiente de Compacidad.

2.1.2.4. Diseño de las parcelas de muestreo

La metodología de muestreo se realizó mediante el levantamiento de parcelas de las cuales se realizaron 3 repeticiones para cada uno de los tipos identificados en el proceso de categorización. El muestreo dentro de cada parcela fue sistemático, empleando parcelas circulares de 1000 m² para el muestreo de los fustales, 100 m² para latizales y 5 m² para brinzales. Estas parcelas fueron ubicadas a 1 km de carreteras o caminos para disminuir el efecto de estas en las áreas de muestreo (Daigle 2010).

En las parcelas de 1000 m², se identificó cada árbol según su especie y se midió el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) y altura correspondiente. En estas mismas parcelas, se identificaron y contaron los tocones de árboles de pino que fueron cortados durante el control de la plaga. En las parcelas de 100 m² y 5 m², se contaron e identificaron por nombre científico todos los árboles presentes.

2.1.2.5. Índices de vegetación como variable respuesta

Los índices de vegetación utilizados en el presente estudio corresponden al Índice de Vegetación por Diferencia Normalizado (NDVI), Índice de Clorofila Verde (GCI) y el Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI), los cuales se obtuvieron a partir del uso de imágenes Landsat correspondientes al periodo del año 2012 al 2023 (12 años), estos fueron elegidos siguiendo los argumentos de (Guerra-Martínez, García-Romero, & Martínez-Morales, 2020), en los que establece el periodo de recuperación (resiliencia) de los componentes que integran un bosque. En este caso se tomó en consideración la media de los índices antes mencionados como respuesta a la recuperación de la densidad de individuos, la cual se establece regresa de entre 3 a 5 años (Kennard, 2002); (Dupuy, y otros, 2011).

La obtención de los índices de vegetación se hizo mediante el procesamiento de imágenes Landsat. Se descargaron dos imágenes para cada año para abarcar el área de estudio y se recopilaron imágenes desde el año 2012 hasta 2023. Una vez se contaba con todas las imágenes se utilizó QGIS y se creó una herramienta para correr de manera sistemática todas las imágenes. Utilizando las siguientes ecuaciones.

$$\text{Ecuación 1)} \quad NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

$$\text{Ecuación 2)} \quad GCI = \frac{NIR}{Green - 1}$$

$$\text{Ecuación 3)} \quad ARVI = \frac{(NIR - (Red) + Blue)}{(NIR + (Red) - Blue)}$$

2.1.2.6. Análisis estadísticos

Se evaluó la correlación existente entre las variables dependientes (incendios, distancia a ríos, pendiente, elevación, precipitación acumulada, temperatura máxima, temperatura mínima y distancia a poblados); como variable dependiente se utilizó la media de los índices de vegetación para identificar si existe explicación estadística de la dinámica temporal y espacial con las métricas utilizadas, el test de correlación de Spearman fue aplicado para evaluar las significancias por tratarse de conjuntos de datos que no poseen una distribución normal. Para la variable tipo de parche se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis debido a que es una variable categórica.

Para la categorización de los niveles de resiliencia se elaboró un análisis de discriminación con la finalidad de diferenciar las características intrínsecas de los grupos de muestreo, identificar sus similitudes y diferencias; en este mismo contexto se realizó un análisis clúster para agrupar los sitios de acuerdo con sus características.

En cuanto a los niveles de resiliencia referente a los valores de la media de los índices de vegetación utilizados, se estableció el valor inicial (valor Tiempo1) como la media del valor en el año 2012 para calcular la media del año 2013 (Tiempo2) y calcular la relación para identificar en que porcentaje se habían recuperado los valores actuales a los valores iniciales.

Para comparar las medias de los valores en los puntos afectados y los puntos testigos se utilizó un Análisis de Varianza y una prueba de Games-Howell, el ANOVA asume la igualdad en el número de muestras para los dos grupos, mientras que no asume una diferencia en la varianza de estos dos grupos, debido a esta diferencia en las varianzas el análisis se complementa con la prueba de Games-Holléll.

2.1.3. RESULTADOS

La recuperación de la cobertura aérea representada por la media de los Índices de Vegetación en el presente estudio, están correlacionadas estadísticamente a la

precipitación, dato que se compara y confirma los resultados de (Gazol, y otros, 2017). Como se observa en el cuadro 2.

Cuadro 3. Correlación de las variables evaluadas en relación con la línea de tiempo de la media de los índices de vegetación para el periodo de 2012 al 2023.

Variable dependiente	Variable independiente	Shapiro-Wilk normality test	p-value	Coefficiente rho
Media de los índices de vegetación	Incendios	2.20E-16	0.792	0.0147010
	Precipitación	1.43E-08	0.00047**	0.1933263
	Temperatura máxima	1.57E-14	0.671	0.0236784
	Temperatura mínima	1.76E-10	0.585	-0.0304558
	Distancia a poblados	6.28E-09	0.157	0.0788492
	Distancia a ríos	2.20E-16	0.881	-0.0083455
	Pendiente	6.67E-10	0.462	0.0409857
	Elevación	4.37E-15	0.501	-0.0374793
	Forma y tamaño	Var. Categórica	0.5236	NA

**valor p menor a 0.05, significancia estadística.

De manera general en los 27 puntos de muestreo, de acuerdo con los valores medios de los Índices de Vegetación existe una tendencia a disminuir en sus valores a partir del año 2012 en referencia a los valores anteriores; esta etapa corresponde al punto inicial del estudio al cual le llamaremos “Etapa Antes de Afectación”, los valores medios de los índices presentan una tendencia a mejorar (aumentar) a partir del año 2019, etapa a la cual llamaremos “Etapa Después de Afectación” como se observa en la figura 2. Estas mejoras están correlacionadas directamente con los resultados del análisis de correlación anterior en el cual muestra una relación positiva entre la precipitación y los valores medios de los índices de vegetación (ver el tamaño de los círculos en el gráfico).

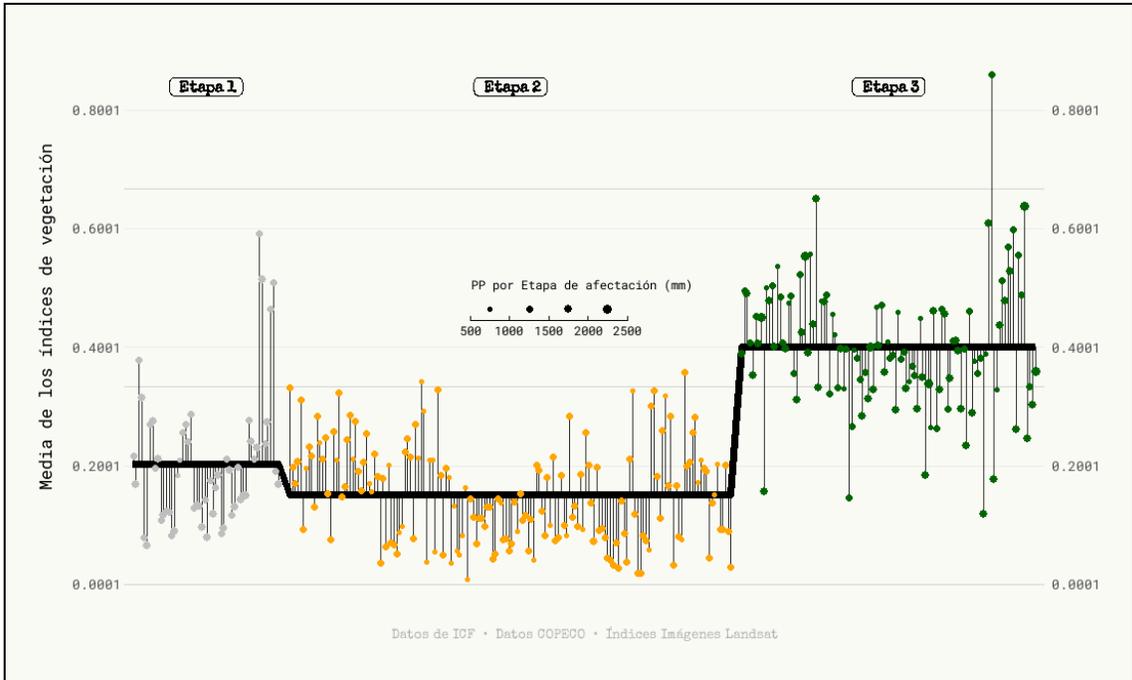


Figura 2. Valores medios de los índices de vegetación para las parcelas de muestreo, Etapa 1 = Antes del ataque del gorgojo (2012 y 2013), Etapa 2 = Durante el ataque del gorgojo (2014 al 2019) y Etapa 3 = Después del ataque del gorgojo (2020 al 2023).

Se observa una tendencia en el aumento de la media de los índices de vegetación utilizados en el estudio a partir del año 2019 última actualización de los brotes registrados en el territorio nacional (Figura 3.).

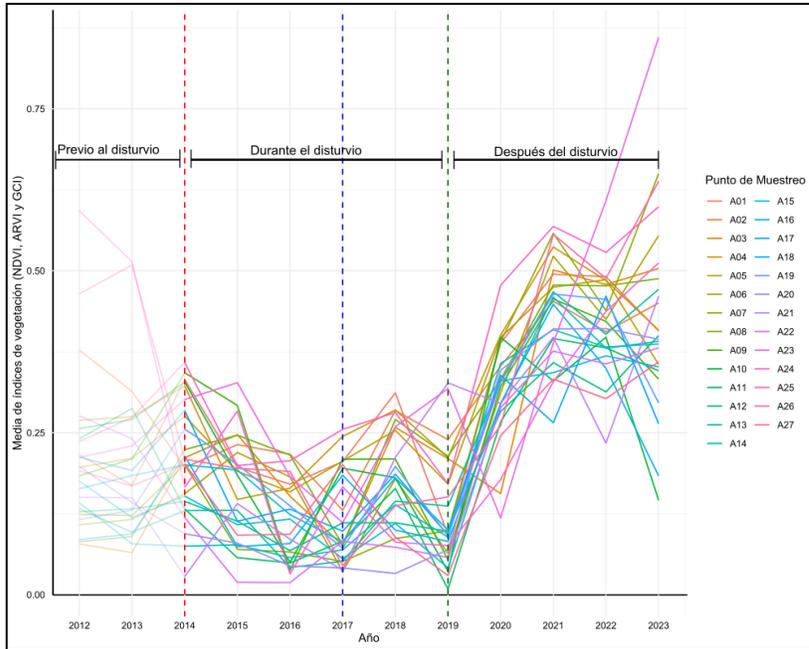


Figura 3. Línea de tiempo de la media de los índices de vegetación (NDVI, ARVI y GCI) para los puntos afectados por la plaga del gorgojo; la línea roja, azul y verde punteada representan los 3 eventos registrados de afectación en el lapso evaluado.

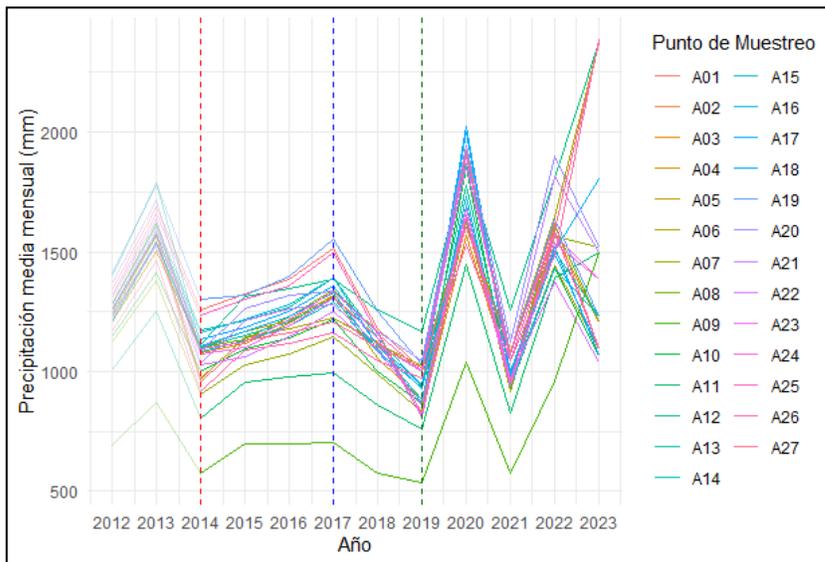


Figura 4. Precipitación media mensual para los puntos muestreados, durante el periodo del año 2012 al 2023.

Las imágenes utilizadas para el cálculo de los valores medios de los índices de vegetación muestran una leve mejora espacial en cuanto a los valores referentes del año 2014 (año en el que se hace evidente la afectación a escala mayor debido a la afectación que comenzó en el 2013) y el año 2023 como se muestra en la figura 5.

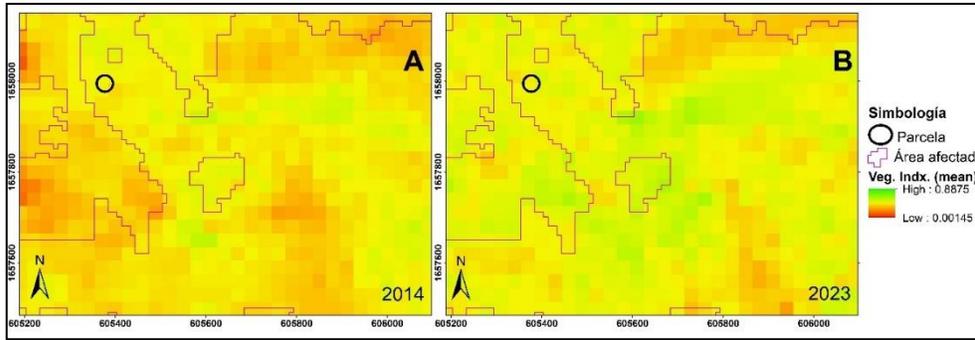


Figura 5. Media de los índices de vegetación para un parche que corresponden a las parcelas de muestreo (parche No. 9). A=media del año 2014, inicio del tercer mayor registro de brotes desde 1982, B= media del año 2023, final del estudio.

De acuerdo con los resultados de los análisis multiespectrales de las imágenes Landsat utilizadas, 25 de las parcelas muestreadas evidencian una mejora notable en cuanto a los índices de vegetación, sin embargo 2 de las 27 parcelas aún se encuentran en etapas de recuperación (cuadro 3 y figura 4), estas parcelas se encuentran localizadas en la comunidad El Tigre, municipio de Lepaguare (parcela 10) y San Juan en el municipio de Esquías (parcela 24).

Cuadro 4. Nivel de recuperación de la media de los índices de vegetación en el año 2023 referentes al año 2012.

Punto	Nivel de recuperación en relación a 2012	Punto	Nivel de recuperación en relación a 2012	Punto	Nivel de recuperación en relación a 2012
A01	188%	A10	57%	A19	255%
A02	119%	A11	144%	A20	199%
A03	642%	A12	312%	A21	307%
A04	152%	A13	355%	A22	138%
A05	181%	A14	273%	A23	406%
A06	514%	A15	223%	A24	86%
A07	525%	A16	215%	A25	253%
A08	597%	A17	216%	A26	137%
A09	181%	A18	124%	A27	188%

Los resultados del cuadro 3 y la figura 6 se muestra además que los puntos en los cuales se evidencia mejor capacidad de resiliencia representada por los valores medios de los Índices de vegetación se encuentran en el departamento de Gualaco, parcela 3, parcela 6, parcela 7 y parcela 8; Campamento, parcela 12; Guaimaca, parcela 13; Villa de San Francisco, parcela 14; Valle de Ángeles, parcela 21 y Minas de Oro la parcela 23.

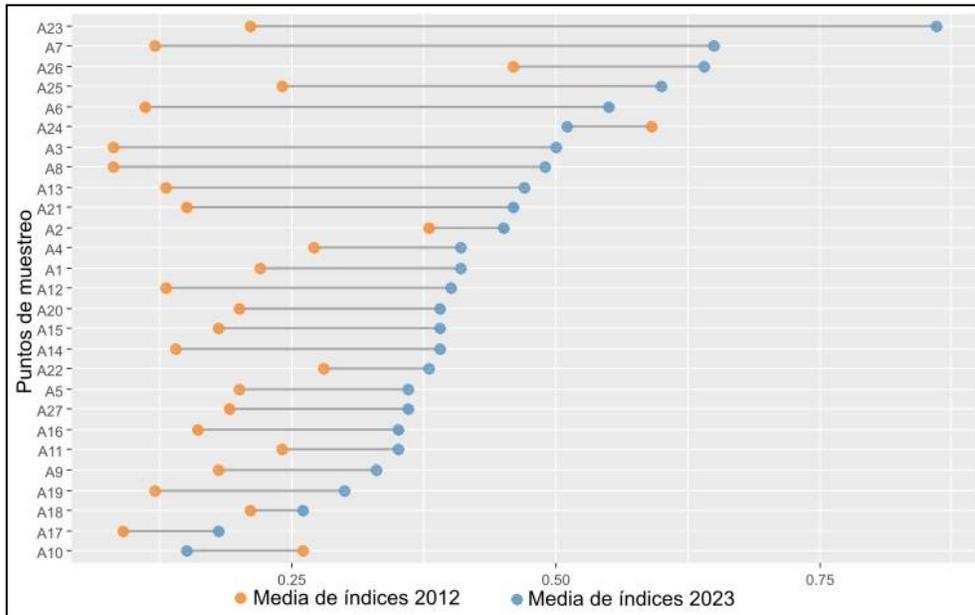


Figura 6. Diferencia de la media de los índices de vegetación (NDVI, ARVI y GCI) para los puntos afectados por la plaga del gorgojo a partir del año 2012 al 2023.

En la figura 7 se muestran los resultados del análisis discriminante, en el cual se evaluó la probabilidad de encontrar sitios con las características topográficas, bioclimáticas y socioeconómicas similares a los 27 puntos muestreados, esto a manera de diagnosticar en general el estado de resiliencia del bosque de pino que haya sido afectado por la plaga del gorgojo en relación con los valores de los índices de vegetación. El modelo discriminante se sustenta con los resultados de la figura 8, análisis de sensibilidad y especificidad en la que se observa que los aciertos positivos que tuvo el modelo (línea color azul) y los aciertos negativos que se identificaron (color rojo).

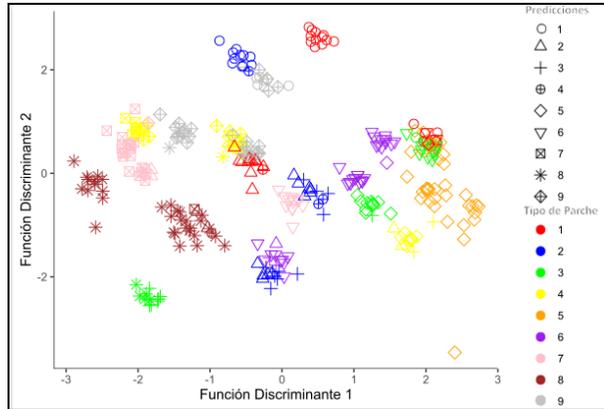


Figura 7. Análisis discriminante para la categorización de los puntos de muestreo de acuerdo al tipo de parche en función de las variables utilizadas en el estudio.

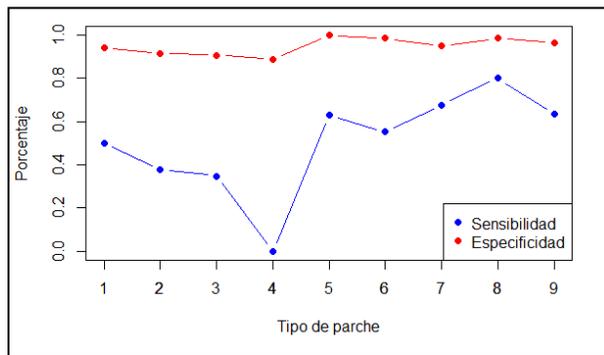


Figura 8. Sensibilidad y especificidad por tipo de parche para el modelo de análisis discriminante.

Análisis de Varianza:

El valor p obtenido en la prueba de normalidad Shapiro-wilk fue 0.4192. Este valor p es mayor que el nivel de significancia ($p < 0.05$). Por lo anterior, no hubo suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los datos provienen de una distribución normal.

Cuadro 5. ANOVA para las medias de los valores de Índices de Vegetación en los sitios afectados y los sitios testigos.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr (>F)
Tipo de afectación	1	0.1647	0.16473	5.536	0.0225 *

Residuals	52	1.5474	0.02976		
------------------	----	--------	---------	--	--

Signif. codes: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

El análisis de varianza (ANOVA) muestra una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos T (parcelas de muestreo en bosques de pino no afectadas por la plaga del gorgojo) y A (parcelas de muestreo en bosques de pino afectadas por la plaga del gorgojo) en cuanto al índice medio ($F = 5.536$, $p = 0.0225$). Esto sugiere que la presencia de la plaga del gorgojo podría tener un impacto en los valores medios de los Índices de Vegetación en las parcelas de muestreo en bosques de pino en Honduras.

Además, los resultados de la prueba de Games-Howell, confirma la diferencia estadística significativa de las medias en el ANOVA. Figura 9.

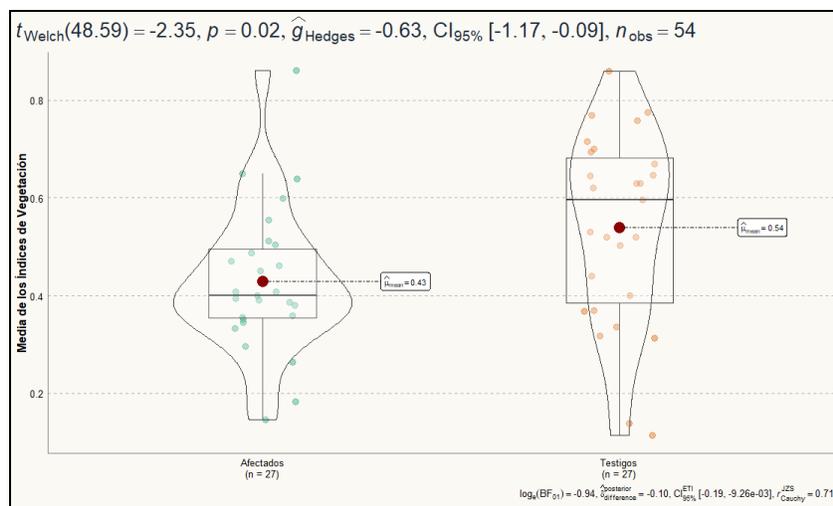


Figura 9. Media de los índices de vegetación como respuesta a la salud actual del bosque de pino en parcelas de muestreo para sitios afectados por la plaga del gorgojo y sitios no afectados, (A=sitios afectados y T=sitios no afectados).

2.1.3.1. Fustales (DAP > 10 cm)

La evaluación de los fustales mostró que la forma del parche no es un factor que explique la recuperación de las áreas afectadas por el gorgojo descortezador. Para todos los criterios analizados resultó el tamaño no presenta diferencia significativa ($p > 0.05$). Sin embargo, en el caso de la forma, esta presenta diferencias en los criterios de área basal total, área basal de pino, número total de árboles de pino y diámetro promedio de los árboles de pino. Los fustales explican el impacto que se tuvo en el bosque debido al ataque del gorgojo, por lo cual se puede decir que el nivel del daño sufrido por el bosque no varió por el tamaño del parche generado, pero si por la forma de este (Cuadro 6).

Cuadro 6. ANOVA para los criterios dasométricos sobre el impacto del gorgojo descortezador en los boques de pino en Honduras (n=54).

Criterio	Tamaño	Forma
Área basal total	No significativo	Significativo
Número total de árboles	No significativo	No significativo
Área basal pino	No significativo	Significativo
Número total árboles pino	No significativo	Significativo
Diámetro promedio árboles pino	No significativo	Significativo

Los sitios que fueron afectados por el gorgojo descortezador y que terminan con parches con forma muy alargada presentaron para los criterios de área basal total, área basal de la especie de pino, número total de árboles de pino y diámetro promedio de los árboles de pino las mayores diferencias entre los sitios afectados con respecto a los testigos (no afectados). Esta forma de parche presentó diferencias significativas con respecto a las otras dos formas ($p < 0.05$) (cuadro 7).

Cuadro 7. Análisis de las diferencias de medias de las áreas basales y el número de individuos entre sitios afectados, no afectados y la forma del parche.

Forma del parche	Área basal total	Área basal pino	Número total árboles pino	Diámetro promedio árboles pino
Muy alargado	30.5 ^a	31.5 ^a	250 ^a	15.42 ^a
Alargado	19.1 ^b	1.89 ^b	112.2 ^b	8.07 ^b
Moderadamente circular	18.2 ^b	1.81 ^b	145.6 ^{ab}	9.84 ^b

Podría atribuirse esta diferencia en la forma de los parches al patrón de diseminación del gorgojo descortezador. Como evidencia (Gomez & Hartel, 2010), la dispersión del gorgojo está altamente influenciado por las corrientes de viento y la topografía. El tener sitios donde los vientos se mantuvieron constantes en la dirección, la probabilidad de generar parches muy alargados era mayor. Esto mantenía una mayor concentración de la población del gorgojo, produciendo un mayor daño. En el caso de los sitios con forma alargado o moderadamente circular, la distribución de la población del gorgojo tendiendo a distribuirse en una mayor

área, reduciendo de esta forma su agresividad. De tal forma que cuando el avance de la plaga se mantuvo concentrada, resultaba en un mayor daño al sitio.



2.1.3.2. Latizales (5 cm < DAP < 10 cm)

Se encontró diferencia significativa ($p < 0.05$) en el factor forma, pero no en el tamaño del parche. Analizando la cantidad de latizales de todas las especies, los parches pequeños la mejor recuperación posterior al brote del gorgojo, con una diferencia de 611 árboles/ha más en las áreas afectadas con respecto a las áreas no afectadas. En el otro extremo están los parches grandes, que presentan la menor diferencia de árboles entre las áreas afectadas y las no afectadas, con 33 árboles/ha a más en las áreas afectadas con respecto a la no afectada. La diferencia entre los parches grandes y los pequeños es estadísticamente significativa ($p < 0.05$). Los parches medianos presentaron una diferencia de 456 árboles más en las áreas afectadas con respecto a las no afectadas, pero no es diferente ($p > 0.05$) con lo encontrados en los parches grandes y pequeños.

Separando el género *Pinus*, se encontró un comportamiento similar al anterior. No se presentan diferencias significativas ($p > 0.05$) para la forma de parche, pero si para el tamaño ($p < 0.05$). Los parches pequeños son los que presentan la mejor diferencia de brinzales entre los sitios afectados con los no afectados (611 árboles/ha), siendo diferente a los parches grandes ($p < 0.05$), pero no a los medianos ($p > 0.05$). Los parches grandes son los que presentaron la menor diferencia entre las áreas afectadas y las no afectadas (33 árboles/ha).

Cuadro 8. Análisis de las diferencias de medias del total de árboles de todas las especies y solamente la especie de pino, entre sitios afectados, no afectados y la forma del parche.

Criterio	Tamaño	Forma
Total, de árboles todas especies	No significativo	No significativo
Total, árboles pinos	No significativo	Significativo

2.1.3.3. Brinzales (*DAP < 5 cm*)

El estado de la regeneración natural en los sitios afectados se puede calificar como buena. En todas las condiciones analizadas, se encontró por lo menos una diferencia de 1,440 árboles/ha entre las áreas afectadas y las no afectadas. Considerando todas las especies, se encontró que la forma del parche está afectando la regeneración natural ($p < 0.05$), pero no el tamaño del parche ($p > 0.05$).

Los parches con forma muy alargada son los que presentan una mayor respuesta en función de la regeneración natural. Se encontraron 6,670 plántulas/ha mayor en los sitios afectados con respecto a los sitios no afectados, siendo diferente ($p < 0.05$) a los sitios de forma alargada y muy circular. Por otro lado, los sitios alargados y muy circulares no presentaron diferencia significativa entre ellos ($p > 0.05$), presentando 1,440 plántulas/ha y 1,780 plántulas/ha respectivamente.

Separando la regeneración del pino, se encontró un comportamiento similar al reportado para todas las especies. Sin embargo, se encontró una mayor diferencia de plántulas entre las áreas afectadas con respecto a las no afectadas, evidenciando que acontecimientos como los brotes del gorgojo son un factor que contribuyen a la regeneración del bosque de pino. Las especies del género *Pinus* son heliófilas, por lo cual muestran una respuesta positiva al estímulo de disposición de energía solar. En todos los casos analizados se encontró una diferencia mayor que 2,560 plántulas/ha de pino entre los sitios afectados en comparación con los afectados.

Se encontró que la forma del parche ($p < 0.05$) influencia la cantidad de plántulas, pero esto no ocurre con el tamaño del parche ($p > 0.05$). Los parches muy alargados son los que presentaron la mayor diferencia en plántulas entre los sitios afectados y los no afectados. Se encontró una diferencia de 8,890 plántulas/ha mas en las áreas afectadas con respecto a las no afectadas. Esto es diferente a lo encontrado

en los parches alargados ($p < 0.05$), pero no diferente a lo reportado en los muy circulares ($p > 0.05$). En los parches alargados se encontraron 2560 plántulas/ha más en las áreas afectadas con respecto a las no afectadas, mientras que en los parches muy circulares se encontraron 5,000 plántulas/ha a más en los sitios afectados con respecto a los no afectados. No se encontró diferencia ($p > 0.05$) entre los sitios de forma alargada con los de forma muy circular.

2.1.4. CONCLUSIONES

Efecto de la forma del parche en la regeneración: La forma del parche influye significativamente en la regeneración natural. Los parches con forma muy alargada mostraron la mayor respuesta en términos de regeneración natural, con hasta 6670 plántulas/ha más en las áreas afectadas en comparación con las no afectadas. Esta diferencia es estadísticamente significativa y sugiere que la forma del parche puede jugar un papel crucial en la recuperación post-ataque del gorgojo.

Distribución y número de árboles: El número total de árboles de pino y el área basal en los sitios afectados presentan diferencias significativas dependiendo de la forma del parche. Los parches con forma muy alargada tuvieron la mayor cantidad de árboles de pino y el mayor diámetro promedio en comparación con los parches alargados y muy circulares.

Comparación de la densidad de plántulas entre sitios afectados y no afectados: Los sitios afectados por el gorgojo descortezador muestran una densidad significativamente mayor de plántulas de pino en comparación con los sitios no afectados. Esto indica que el disturbio causado por el gorgojo, al abrir el dosel del bosque y aumentar la disponibilidad de luz, favorece la regeneración de las plántulas de pino, creando condiciones óptimas para su crecimiento y estableciendo un contraste notable en la recuperación del ecosistema frente a las áreas no perturbadas.

Influencia de la forma, no del tamaño: Aunque la forma del parche influye en la cantidad de plántulas, el tamaño del parche no presentó un impacto significativo en la recuperación del bosque de pino. Esto indica que la configuración espacial es más relevante que la extensión en términos de regeneración natural.

Variaciones en los índices de vegetación: Los valores medios de los índices de vegetación (NDVI, ARVI, y GCI) han mostrado una tendencia a mejorar desde el año 2019, coincidiendo con una mejora en la resiliencia del bosque después del ataque del gorgojo. Esta mejora está correlacionada con un aumento en la precipitación, lo que sugiere una relación positiva entre las condiciones climáticas y la recuperación del bosque.

2.1.5. RECOMENDACIONES

Para mejorar la comprensión de la resiliencia del bosque de pino afectado por el gorgojo, se recomienda establecer parcelas de muestreo permanente. Esto permitirá recopilar datos a lo largo del tiempo y confirmar la teoría de (Kennard, 2002) sobre el tiempo de recuperación de los componentes del bosque. La información a recolectar debe incluir índices de vegetación (NDVI, ARVI, GCI y otros), cobertura vegetal, densidad de plántulas, latizales y fustales, especies presentes y su estado de salud, datos climáticos y edáficos (temperatura, precipitación, pH, nutrientes, textura del suelo), humedad del suelo y contenido de materia orgánica, datos topográficos (altitud, pendiente, orientación del terreno), proximidad a cuerpos de agua y caminos, y datos de disturbios (historial de incendios, plagas, y actividades humanas).

Las parcelas deben ser de 1000 m² para fustales, 100 m² para latizales y 10 m² para brinzales, y deben estar replicadas en áreas afectadas y no afectadas, con diferentes formas y tamaños de parches. Esta monitorización continua facilitará la identificación de patrones y tendencias en la recuperación del bosque, desarrollando estrategias de manejo forestal efectivas y sostenibles.

2.1.6. BIBLIOGRAFÍA

Abatzoglou, J., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific data*.

Adámek, M., Hadincová, V., & Wild, J. (2016). Long-term effect of wildfires on temperate *Pinus sylvestris* forests: Vegetation dynamics and ecosystem resilience. *Forest Ecology and Management*, 28. 285 - 295.

Andrus, R. A., Hart, S. J., & Veblen, T. T. (2020). Forest Recovery Following synchronous outbreaks of spruce and western balsam bark beetle is slowed by ungulate browsing. *Ecology*, 101:(5). 1 - 13.

Billings, R. F., Clarke, S. R., Espino Mendoza, V., Cordón Cabrera, P., Meléndez Figueroa, B., Campos, J. R., & Baeza, G. (2004). Gorgojo descortezador e incendios: una combinación devastadora para los pinares de América Central. *Unasylva*, 15-21.

Cañibano, A., & Gandini, M. (2018). El concepto de Rectángulo Equivalente para la caracterización de la forma de una cuenca. *Eco matemático*, 6-13.

Cole, L., Bhagwat, S. A., & Willis, K. J. (2014). Recovery and resilience of tropical forests after disturbance. *Nature Communications*, 1 - 7.

Convention on Biological Diversity; UNEP. (2009). *Forest Resilience, Biodiversity, and Climate Change: A Synthesis of the Biodiversity/Resilience/Stability Relationship in Forest Ecosystems*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity.

Deepa, P. S., Roques, A., & Battisti, A. (2018). Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports*, 4(2): 35 - 50.

DeRose, R. J., & Long, J. N. (2014). Resistance and Resilience: A Conceptual Framework for Silviculture. *Forest Sciences*, 60(6): 1205 - 1212 .

Dhar, A., Parrott, L., & Hawkins, C. (2016). Aftermath of Mountain Pine Beetle Outbreak in British Columbia: Stand Dynamics, Management Response and Ecosystem Resilience. *Forests*, 7. 1 - 19.

Dupuy, J. M., Hernández-Stefanoni, J. L., Hernández-Juárez, R. A., Tetetla-Rangel, E., López-Martínez, J. O., Leyequién-Abarca, E., . . . May-Pat, F. (2011). Patterns and Correlates of Tropical Dry Forest Structure and Composition in a Highly Replicated Chronosequence in Yucatan, Mexico. *Biotropica*.

Fettig, C. J., & McKelvey, S. R. (2014). Resiliency of an Interior Ponderosa Pine Forest to Bark Beetle Infestations Following Fuel-Reduction and Forest-Restoration Treatments. *Forest*, 5. 153 - 176.

Gazol, A., Camarero, J. J., Vicente-Serrano, S. M., Sánchez-Salguero, R., Gutierrez, E., de Luis, M., . . . Galván, D. (2017). Forest resilience to drought varies across biomes. *Global Change Biology*, 1-16.

Gomez, C. A., & Hartel, M. (2010). *El gorgojo de la corteza del pino, Pissodes castaneus*. Serie Técnica: Manejo integrado de plagas forestales. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Gomez, D. F., Sathyapala, S., & Hulcr, J. (2020). Towards Sustainable Forest Management in Central America: Review of Southern Pine Beetle (*Dendroctonus frontalis* Zimmermann) Outbreaks, Their Causes, and Solutions. *Forest*, 173.

Gonzales-De Vega, S., De las Heras, J., & Moya, D. (2016). Resilience of Mediterranean terrestrial ecosystems and fire severity in semiarid areas: Responses of Aleppo pine forests in the short, mid and long term. *Science of the Total Environment*, 573:(15). 1171 . 1177.

Guerra-Martínez, F., García-Romero, A., & Martínez-Morales, M. (2020). Assessment of the ecological resilience of tropical dry forests: a multi-scalar approach. *Madera y bosques*.

Hedo, J., Rubio, E., Dadi, T., Moratalla, A., López-Serrano, F., Alfaro-Sanchez, R., . . . De las Heras, J. (2013). Propuesta de definición de la resiliencia de masas forestales frente a incendios mediante el uso de imágenes de satélite: un ejemplo de estudio en el sureste de la Península. *6to Congreso Forestal Español* (pág. 14). Montes: Servicios y desarrollo rural.

Hood, S. M., Baker, S., & Sala, A. (2016). Fortifying the forest: Thinning and Burning Increase Resistance to a Bark Beetle Outbreak and Promote Forest Resilience. *Ecological Applications*, 26. 1363.

Instituto Nacional de Conservación Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre. (2017). *INFORME DE EPISODIO DE ATAQUE DEL GORGOJO DESCORTEZADOR DEL PINO DENDROCTONUS FRONTALIS EN HONDURAS 2014-2017*. Tegucigalpa, Honduras.: ICF.

Jha, S., Das, J., Sharma, A., Hazra, B., & Goyal, M. K. (2019). Probabilistic evaluation of vegetation drought likelihood and its implications to resilience across India. *Global and Planetary Change*, 176. 23 - 35.

Kennard, D. K. (2002). Secondary forest succession in a tropical dry forest: patterns of development across a 50-year chronosequence in lowland Bolivia. *Journal of Tropical Ecology*.

Larson, A. J., Travis Belote, R., Cansler, A., Parks, S. A., & Dietz, M. (2013). Latent resilience in ponderosa pine forest: effects of resumed frequent fire. *Ecological Applications*, 23:(6). 1243 - 1249.

Lloret, F., Keeling, E. G., & Sala, A. (2011). Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 120. 1909 - 1920.

Magruder, M., Chhin, S., Palik, B., & Bradford, J. B. (2013). Thinning increases climatic resilience of red pine. *Canadian Journal of Forest Research*, 43. 878 - 889.

Mora Donjuan, C. A., & Alanís Rodríguez, E. (2016). La resiliencia como atributo de los bosques de pino-encino en América. *Revista Científica Monfragüe Desarrollo Resiliente*, 7:(1). 137 - 153.

Morris, J. E., Buonanduci, M. S., Agne, M. C., Bataglia, M. A., & Harvey, B. J. (2021). Does the legacy of historical thinning treatments foster resilience to bark beetle outbreak in subalpine forests? *Ecological Applications*.

National Aeronautics and Space Administration. (2023, 09 12). *FIRMS: Fire Information for Resource Management System*. Retrieved from FIRMS: Fire Information for Resource Management System: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/firms>

Schmitt, S., Marechaux, I., Chave, J., Jörg Flischer, F., Pioniot, C., Traissac, S., & Herault, B. (2019). Functional diversity improves tropical forest resilience: Insights from a long-term virtual experiment. *Journal of Ecology*, 108. 831 - 843.

Turner, M. G., Braziunas, K. H., Hansen, W. D., & Harvey, B. J. (2019). Short-interval severe fire erodes the resilience of subalpine lodgepole pine forests. *PNAS*, 116:(23). 11319 - 11328.



Xu, C., Liu, H., Anenkhonov, O. A., Korolyunk, A. Y., Sandanov, D. V., Balsanova, L. D., . . . Wu, X. (2016). Long-term forest resiliencies to climate change indicated by mortality, regeneration, and growth in semiarid southern Siberia. *Global Change Biology*, 23:(1). 2370 - 2382.

Zhang, J., Finley, K. A., Johnson, N. G., & Ritchie, M. W. (2019). Lowering Stand Density Enhances Resiliency of Ponderosa Pine Forests to Disturbances and Climate Change. *Forests Sciences*, 65:(4). 496 - 507.

3. PRODUCTO 2 - DIRECTRICES PARA LA APLICACIÓN DE ACCIONES CORRECTIVAS E INDUCCIÓN DE RESILIENCIA EN BOSQUES AFECTADOS POR DIFERENTES DENSIDADES.

3.1. DIRECTRICES PARA LA APLICACIÓN DE ACCIONES CORRECTIVAS E INDUCCIÓN DE RESILIENCIA EN BOSQUES AFECTADOS POR DIFERENTES DENSIDADES.

3.1.1. INTRODUCCIÓN

Honduras es un país con una rica diversidad ecológica, y sus bosques de pino representan un componente crucial de su patrimonio natural. Estos bosques no solo son vitales para la biodiversidad, sino que también juegan un papel esencial en la regulación climática, la prevención de la erosión del suelo y el sustento de numerosas comunidades rurales. Sin embargo, los bosques de pino hondureños están enfrentando desafíos cada vez más graves, como la deforestación, la degradación del suelo, los incendios forestales, las plagas (especialmente el gorgojo de pino), y los efectos del cambio climático. Estas amenazas han exacerbado la vulnerabilidad de estos ecosistemas, subrayando la necesidad urgente de implementar estrategias efectivas de manejo forestal.

La densidad de los árboles en un bosque es un factor crítico que influye en su salud y resiliencia. La gestión adecuada de la densidad puede mejorar significativamente la capacidad de un bosque para resistir y recuperarse de perturbaciones. En este contexto, las "Directrices para Aplicar Acciones Correctivas e Inducir la Resiliencia Según las Densidades en los Bosques de Pino Afectados en Honduras" proporcionan un marco estratégico para abordar estos desafíos. Estas directrices están diseñadas para guiar al ICF, comunidades locales, propietarios privados de áreas forestales y técnicos en la implementación de prácticas de manejo forestal adaptativas y sostenibles que promuevan la resiliencia del bosque de pino.

El enfoque de estas directrices es triple: primero, se enfoca en la evaluación precisa de la densidad del bosque a través de inventarios detallados y el uso de tecnologías avanzadas. Segundo, sugiere acciones correctivas específicas adaptadas a las diferentes densidades forestales, tales como el raleo en áreas de alta densidad y la reforestación en áreas de baja densidad. Tercero, enfatiza la importancia de la participación comunitaria y la educación ambiental, asegurando que las comunidades locales estén involucradas y capacitadas en la gestión sostenible de los bosques.

Además, las directrices abogan por un fortalecimiento del marco normativo y la gobernanza, promoviendo la coordinación interinstitucional y la creación de mecanismos financieros para apoyar las actividades de manejo forestal. La integración de la investigación aplicada y el uso de tecnologías innovadoras son

aspectos clave, permitiendo un manejo basado en datos y adaptativos que responda a las necesidades del bosque y las comunidades locales.

Estas directrices representan una respuesta integral y contextualizada a los retos que enfrentan los bosques de pino en Honduras. A través de la implementación efectiva de estas acciones correctivas, se busca no solo mitigar los impactos actuales, sino también construir una base sólida para la resiliencia futura de estos ecosistemas vitales, asegurando su sostenibilidad a largo plazo y el bienestar de las generaciones venideras.

3.1.1.1. PROPUESTA DE DIRECTRICES

Evaluación de la Densidad del Bosque

Inventarios de Densidad:

Realizar inventarios forestales periódicos es esencial para evaluar la densidad de los árboles en diferentes parcelas del bosque de pino en Honduras. Estos inventarios deben realizarse en intervalos regulares, cada 3 a 5 años, para asegurar que se detecten cambios significativos en la estructura y composición del bosque a tiempo. Este proceso implica la medición sistemática del diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de los árboles.

Para esto es importante el establecimiento de Parcelas Permanentes de Monitoreo. En primera instancia se propone la recuperación de las parcelas establecidas por la COHDEFOR y que fueron monitoreadas con apoyo del Servicio Forestal de Estados Unidos. No obstante, será importante el establecimiento de nuevas parcelas de monitoreo. Para esto se propone la inclusión de estas parcelas en los planes de manejo forestal.

Estas parcelas de monitoreo deben establecerse en sitios representativos, empleando los elementos necesarios para dar el seguimiento en crecimiento a cada árbol. Se recomiendan parcelas circulares de 1,000 m² para medir los fustales, 100 m² para medir los latizales y 10 m² para los brinzales.

Además de las técnicas tradicionales de medición, es fundamental incorporar herramientas tecnológicas avanzadas para mejorar la precisión y eficiencia de los inventarios forestales. Los drones, equipados con cámaras de alta resolución y sensores LIDAR (Light Detection and Ranging), pueden sobrevolar grandes extensiones de bosque, capturando imágenes detalladas y datos tridimensionales. La tecnología permite una visión integral del bosque, incluyendo la densidad de copas y la estructura vertical, algo muy útil en áreas de difícil acceso.

Los sistemas de información geográfica (SIG) también juegan un papel crucial en la evaluación de la densidad del bosque. Los SIG permiten integrar y analizar los datos recopilados por los drones y otros métodos de campo, facilitando la creación de mapas precisos de densidad forestal. Estos mapas son herramientas poderosas para la planificación y gestión forestal, ya que proporcionan una representación visual clara de las áreas con diferentes densidades, ayudando a identificar zonas que requieren intervención, como clareo en áreas de alta densidad o reforestación en áreas de baja densidad.

Es importante que los inventarios de densidad no se limiten a la recopilación de datos, sino que también involucren a las comunidades locales en el proceso. Capacitar a los miembros de la comunidad en técnicas de medición y uso de tecnologías puede fomentar un sentido



de propiedad y responsabilidad hacia la gestión forestal sostenible. Además, la integración de datos históricos y nuevos datos tecnológicos puede proporcionar una perspectiva más completa sobre la dinámica del bosque, permitiendo a los gestores forestales hacer predicciones más informadas y tomar decisiones basadas en evidencia.

La combinación de evaluaciones periódicas tradicionales y tecnologías avanzadas como drones y SIG, junto con la participación comunitaria, constituye una estrategia robusta para la realización de inventarios de densidad en los bosques de pino de Honduras. Esta metodología no solo mejora la precisión y eficiencia de la recopilación de datos, sino que también fortalece la gestión sostenible y la resiliencia de estos ecosistemas vitales.

Clasificación de Densidades:

Para gestionar efectivamente los bosques de pino, es crucial clasificar las áreas del bosque según la densidad de árboles por hectárea (árboles/ha). Esta clasificación ayuda a identificar áreas que necesitan acciones correctivas específicas. A continuación, se proponen tres categorías de densidad, considerando los árboles con DAP > 10 cm:

Baja Densidad: Menos de 500 árboles/ha. Estas áreas pueden estar afectadas por deforestación, degradación del suelo, o haber sido impactadas por plagas y enfermedades. Se recomienda la reforestación y la plantación de especies nativas adaptadas. Es fundamental mejorar las condiciones del suelo mediante la aplicación de enmiendas orgánicas y establecer coberturas vegetales para proteger contra la erosión.

Densidad Media: 500 - 1000 árboles/ha: Estas áreas tienen una estructura forestal relativamente equilibrada, pero aún pueden beneficiarse de un manejo activo para optimizar la salud y resiliencia del bosque. Aplicar prácticas de silvicultura adaptativa, como el raleo selectivo para promover el crecimiento saludable de los árboles y la regeneración natural. Además, se deben implementar programas de monitoreo continuo para ajustar las prácticas de manejo según las necesidades.

Alta Densidad: Más de 1,000 árboles/ha. Áreas con alta densidad pueden sufrir de competencia excesiva por recursos, lo que puede llevar a una mayor vulnerabilidad a plagas, enfermedades e incendios forestales. Realizar clareos y raleos para reducir la densidad y disminuir la competencia. Crear y mantener cortafuegos y manejar el combustible forestal para prevenir incendios. También es importante implementar técnicas de control de plagas y enfermedades.

Estas categorías de densidad y sus respectivas acciones correctivas proporcionan un marco estructurado para gestionar los bosques de pino en Honduras. Este enfoque basado en la densidad permite a los gestores forestales aplicar medidas específicas y efectivas, promoviendo así la resiliencia y sostenibilidad de estos ecosistemas vitales.

Acciones Correctivas Según la Densidad

Áreas de Alta Densidad:

Clareo y Raleo: El clareo y raleo de los bosques de pino pretende reducir la competencia entre árboles por recursos esenciales como la luz, el agua y los nutrientes del suelo. Al disminuir la densidad del bosque, se mejora la disponibilidad de estos recursos para los árboles restantes, lo que promueve un crecimiento más saludable y vigoroso. Además, estas prácticas disminuyen la vulnerabilidad del bosque a plagas y enfermedades, al reducir



la densidad y la competencia, y mejorar la circulación del aire y la penetración de la luz solar.

El método para realizar el clareo y raleo consiste en realizar cortes selectivos, eliminando los árboles enfermos, dañados o con menor calidad en cuanto a crecimiento y salud. Esta selección cuidadosa de los árboles a eliminar permite mejorar la estructura y composición del bosque, favoreciendo la regeneración natural y la resiliencia del ecosistema.

Es recomendable programar estos clareos periódicamente, cada 3 a 5 años, considerando la tasa de crecimiento de los árboles y las condiciones particulares del sitio. Esta periodicidad permite mantener un control adecuado sobre la densidad del bosque, evitando la excesiva competencia por recursos y garantizando un crecimiento sostenible a largo plazo.

Prevención de Incendios: La prevención de incendios es una parte crucial del manejo de bosques de alta densidad. La creación y mantenimiento de cortafuegos es una estrategia efectiva para prevenir la propagación de incendios forestales. Estos cortafuegos actúan como barreras físicas que detienen o ralentizan el avance del fuego, protegiendo áreas críticas del bosque y permitiendo un mejor control de los incendios cuando ocurren. Es vital mantener estos cortafuegos despejados y bien definidos para asegurar su eficacia.

Además, implementar prácticas de manejo de combustible es esencial para reducir la carga de material combustible en el bosque. Esto incluye la eliminación de residuos de tala, como ramas y troncos caídos, y la realización de quemas controladas para reducir la acumulación de materia orgánica seca que pueda alimentar un incendio. Estas prácticas no solo disminuyen el riesgo de incendios, sino que también pueden mejorar la salud del bosque al reciclar nutrientes y promover la regeneración de la vegetación.

Áreas de Baja Densidad:

Reforestación y Plantación: La reforestación y plantación pretende aumentar la densidad del bosque para mejorar su estructura y funcionalidad ecológica. Incrementar la cantidad de árboles no solo contribuye a la recuperación de áreas degradadas, sino que también fortalece el ecosistema, haciéndolo más resiliente frente a perturbaciones como plagas, enfermedades y el cambio climático. Este objetivo es fundamental para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los bosques de pino en Honduras, beneficiando tanto al medio ambiente como a las comunidades locales que dependen de estos recursos.

El método para llevar a cabo la reforestación y plantación incluye la siembra de especies de pino nativas que están adaptadas a las condiciones locales. Es crucial seleccionar especies que puedan prosperar en el clima y suelo específicos del área para asegurar su éxito. Incluir una mezcla de especies nativas en los proyectos de reforestación es igualmente importante. La diversidad de especies aumenta la biodiversidad del bosque y su capacidad para resistir y recuperarse de perturbaciones. Un ecosistema más diverso es más resiliente y capaz de proporcionar una gama más amplia de servicios ecológicos, como el hábitat para la fauna, la mejora del ciclo de nutrientes y la regulación del clima.

Áreas de Densidad Media:

Manejo Sostenible: El manejo sostenible de los bosques de pino se basa en la implementación de prácticas de silvicultura adaptativa, las cuales promueven un equilibrio

óptimo de densidad forestal. Estas prácticas incluyen la selección cuidadosa de árboles para raleo, eliminando aquellos que son menos saludables o que compiten excesivamente por recursos, y fomentando la regeneración natural. Al mantener una densidad adecuada, se mejora la salud general del bosque, se optimiza el uso de los recursos disponibles y se asegura la resiliencia del ecosistema ante perturbaciones ambientales.

El monitoreo continuo es una parte fundamental de la gestión sostenible. Realizar evaluaciones regulares permite ajustar las prácticas de manejo según las condiciones cambiantes del bosque y los resultados obtenidos. Este enfoque adaptativo asegura que la densidad del bosque se mantenga en niveles saludables, permitiendo una respuesta rápida a problemas emergentes y la implementación de medidas correctivas a tiempo. El monitoreo constante es esencial para detectar y abordar cualquier cambio en la salud del bosque, garantizando su sostenibilidad a largo plazo.

Protección Contra Plagas: La protección contra plagas es crucial para mantener la salud de los bosques de pino. Implementar programas de monitoreo para la detección temprana de plagas y enfermedades es vital. Estos programas deben incluir el uso de trampas específicas, como trampas de feromonas para monitoreo y trampas adhesivas para control, así como observaciones visuales para identificar infestaciones en sus primeras etapas. Esto permite una respuesta rápida y eficaz. La detección temprana es fundamental para prevenir la propagación de plagas y minimizar el daño que pueden causar a los árboles y al ecosistema en general.

El control integrado de plagas es una estrategia efectiva para mantener las poblaciones de plagas bajo control. Este enfoque combina métodos biológicos, mecánicos, culturales y químicos de manera equilibrada y sostenible. Las técnicas biológicas pueden incluir la introducción de depredadores naturales de las plagas, mientras que los métodos mecánicos pueden involucrar la eliminación física de los individuos afectados. Por otra parte, el control cultural involucra aplicar prácticas silviculturales adecuadas, como podas, aclareos y manejo de la vegetación, para mantener la salud y resiliencia del bosque. En casos necesarios, se pueden utilizar tratamientos químicos específicos para controlar brotes severos, siempre asegurando que su uso sea seguro y responsable. Esta combinación de técnicas permite un manejo integrado y efectivo de las plagas, asegurando la salud y vitalidad del bosque.

Participación Comunitaria y Educación

Involucramiento Comunitario y propietarios privados de bosques:

Capacitación y Sensibilización: Capacitar a las comunidades locales y a los propietarios privados de bosques en técnicas de manejo forestal es esencial para asegurar la conservación y resiliencia de los bosques de pino. Estas comunidades y propietarios, al estar directamente vinculadas con el entorno forestal, desempeñan un papel crucial en la implementación y éxito de las estrategias de manejo. Realizar talleres y programas educativos que aborden temas como la importancia de mantener densidades adecuadas, las técnicas de reforestación, el control de plagas y enfermedades, y la prevención de incendios, ayuda a construir un conocimiento sólido y práctico. Esta educación fomenta una gestión forestal responsable y promueve prácticas que protegen y mejoran la salud del bosque a largo plazo.

Fomento de la Forestería Comunitaria: Involucrar a las comunidades locales en actividades de forestería comunitaria es una estrategia efectiva para garantizar que las actividades manejo forestal sean eficientes. Cuando las comunidades participan activamente en la gestión de los bosques, no solo se fortalece su conservación, sino que también se aseguran beneficios directos para los pobladores locales. Esto puede incluir la generación de empleo, la mejora de la seguridad alimentaria y la provisión de recursos naturales sostenibles. Al participar en la toma de decisiones y en la ejecución de proyectos, las comunidades desarrollan un sentido de propiedad y responsabilidad hacia el bosque, lo cual es fundamental para la conservación a largo plazo.

La implementación de la forestería comunitaria también facilita la integración del conocimiento local con las prácticas científicas y técnicas de manejo forestal. Esto permite desarrollar estrategias de manejo que son culturalmente apropiadas y ecológicamente efectivas. Además, al fortalecer la colaboración entre las comunidades y las autoridades forestales, se crean redes de apoyo que pueden responder de manera más eficiente a los desafíos ambientales.

Programas Educativos:

Educación Ambiental: Implementar programas de educación ambiental en escuelas y comunidades locales es crucial para aumentar la conciencia sobre la importancia de la gestión adecuada del bosque. Estos programas deben estar diseñados para educar a jóvenes y adultos sobre los beneficios ecológicos, económicos y sociales que brindan los bosques de pino. A través de actividades educativas, como talleres, charlas y excursiones guiadas, los participantes pueden aprender sobre la biodiversidad del bosque, el ciclo de vida de los árboles y la importancia de mantener un equilibrio adecuado de densidad forestal. Fomentar este conocimiento desde una edad temprana garantiza que las futuras generaciones estén mejor preparadas para proteger y gestionar los recursos naturales de manera sostenible.

Campañas de Sensibilización: Realizar campañas de sensibilización es fundamental para abordar problemas específicos como la prevención de incendios y el control de plagas en los bosques de pino. Utilizar medios de comunicación locales, como radios comunitarias, redes sociales y boletines informativos, permite difundir mensajes clave de manera efectiva en el ámbito local. Estas campañas deben incluir información práctica sobre cómo prevenir incendios forestales, tales como la correcta eliminación de residuos de tala y la importancia de mantener cortafuegos. Asimismo, es esencial sensibilizar a la comunidad sobre las técnicas de control de plagas, incluyendo la detección temprana y el manejo integrado.

Las actividades comunitarias, como jornadas de limpieza del bosque, simulacros de respuesta a incendios y talleres sobre manejo de plagas, pueden complementar estas campañas de sensibilización. Estas actividades no solo educan a los participantes, sino que también fomentan un sentido de comunidad y responsabilidad compartida hacia la conservación del bosque. Al involucrar activamente a la comunidad en estas iniciativas, se crea un compromiso colectivo que es vital para el éxito a largo plazo de los esfuerzos de conservación y manejo sostenible.

Políticas y Gobernanza

Marco Normativo:

Desarrollo de Políticas: Fortalecer las políticas y regulaciones relacionadas con el manejo forestal sostenible y la densidad del bosque es fundamental para la conservación efectiva de los bosques de pino en Honduras. Las políticas deben establecer directrices claras sobre las prácticas de manejo forestal que promuevan la salud y resiliencia del bosque. Esto incluye la implementación de incentivos económicos y técnicos para los propietarios de tierras y comunidades que adopten prácticas de manejo sostenibles. Los incentivos pueden tomar la forma de subsidios, asistencia técnica, o compensaciones por provisión de servicios ecosistémicos, incentivando así la adopción de prácticas que beneficien al medio ambiente y a la economía local.

Además, es crucial establecer sanciones rigurosas para las actividades destructivas que dañan los bosques, como la tala ilegal, el uso indiscriminado de pesticidas, y las prácticas de quema no controlada. Estas sanciones deben ser lo suficientemente disuasorias para prevenir comportamientos que ponen en riesgo la integridad del bosque. Al mismo tiempo, las políticas deben ser flexibles y adaptativas, permitiendo ajustes basados en nuevas evidencias científicas y cambios en las condiciones ambientales. Un marco político robusto y dinámico es esencial para asegurar que las prácticas de manejo forestal se mantengan efectivas y relevantes a lo largo del tiempo.

Coordinación Interinstitucional: Fomentar la coordinación entre el gobierno, academias, las ONGs, y el sector privado es vital para la implementación efectiva de acciones correctivas y la gestión de la densidad forestal. La gestión de los bosques de pino requiere un enfoque integrado que combine los recursos y capacidades de diversas entidades. Establecer plataformas de colaboración y comunicación entre estas entidades facilita la implementación de estrategias coherentes y coordinadas. Por ejemplo, el SINFOR, CONAPROFOR entre otros comités interinstitucionales o mesas de trabajo permanentes permite el intercambio de información y la planificación conjunta de acciones. La cooperación interinstitucional también es esencial para responder de manera eficaz a emergencias, como brotes de plagas o incendios forestales, garantizando una respuesta rápida y coordinada.

Además, la participación de las comunidades locales en estos esfuerzos de coordinación es crucial. Las comunidades no solo deben ser vistas como beneficiarios, sino también como socios clave en la gestión forestal. Involucrar a las comunidades en la toma de decisiones y en la implementación de políticas fortalece la legitimidad y efectividad de las acciones emprendidas. La capacitación y el empoderamiento de los líderes comunitarios pueden mejorar significativamente los resultados de conservación y manejo sostenible.

3.1.1.2. FINANCIAMIENTO Y RECURSOS

Financiamiento: El financiamiento y la asignación de recursos son aspectos críticos para la implementación efectiva de acciones correctivas en los bosques de pino de Honduras. Establecer mecanismos de financiamiento sólidos es esencial para asegurar la continuidad y eficacia de los proyectos de manejo forestal sostenible. Esto puede incluir la creación de fondos gubernamentales específicos destinados a la conservación y restauración de bosques. Además, es crucial explorar y asegurar donaciones internacionales de organismos multilaterales, fundaciones y ONGs dedicadas a la conservación ambiental. Otra vía importante de financiamiento son los programas de pagos por servicios ambientales (PSA), que recompensan económicamente a las comunidades y propietarios

de tierras que adoptan prácticas sostenibles y contribuyen a la preservación de los ecosistemas.

Los mecanismos de financiamiento deben estar bien estructurados y ser accesibles para las comunidades locales y otras partes interesadas. Es fundamental establecer criterios claros y transparentes para la asignación de fondos, garantizando que los recursos lleguen a donde más se necesitan. La creación de incentivos económicos directos puede motivar a las comunidades a participar activamente en prácticas de manejo forestal sostenible. Además, la capacitación en gestión financiera y administrativa para los beneficiarios de estos fondos puede asegurar un uso eficiente y responsable de los recursos disponibles.

Alianzas Estratégicas: Formar alianzas estratégicas con organizaciones internacionales y regionales es una estrategia clave para obtener tanto recursos financieros como técnicos. Estas alianzas pueden proporcionar no solo financiamiento, sino también acceso a tecnologías avanzadas, capacitación y experiencias de éxito en la gestión forestal sostenible. Colaborar con entidades como la FAO, el Banco Mundial, o programas regionales como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) puede abrir oportunidades para proyectos conjuntos y la implementación de mejores prácticas globales adaptadas a las condiciones locales de Honduras.

El intercambio de conocimientos y experiencias a través de estas alianzas permite a los gestores forestales hondureños aprender de otros contextos y aplicar soluciones innovadoras y probadas. Las organizaciones internacionales también pueden ofrecer plataformas de formación y desarrollo de capacidades para profesionales y comunidades locales, fortaleciendo así el capital humano necesario para una gestión forestal eficaz. Además, las alianzas estratégicas pueden facilitar el acceso a mercados internacionales para productos forestales certificados, proporcionando una fuente adicional de ingresos para las comunidades involucradas.

Asegurar un financiamiento adecuado y formar alianzas estratégicas son pasos fundamentales para el éxito de las acciones correctivas en los bosques de pino de Honduras. Establecer mecanismos de financiamiento robustos y accesibles, junto con la colaboración con organizaciones internacionales y regionales, no solo garantiza los recursos necesarios sino también el intercambio de conocimientos y el desarrollo de capacidades locales. Estas acciones combinadas fortalecerán la resiliencia y sostenibilidad de los bosques, beneficiando tanto al medio ambiente como a las comunidades que dependen de ellos.

3.1.1.3. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Investigación Aplicada

Realizar estudios de caso es fundamental para evaluar la efectividad de diferentes técnicas de manejo de densidad en los bosques de pino en Honduras. Estos estudios proporcionan datos empíricos sobre los resultados de diversas prácticas de manejo, permitiendo identificar las estrategias más efectivas y adaptarlas a las condiciones locales. Es esencial publicar y compartir los resultados de estos estudios con las partes interesadas, incluyendo comunidades locales, autoridades forestales, ONGs y el sector privado. La difusión de este conocimiento asegura que las mejores prácticas sean adoptadas ampliamente, mejorando la eficiencia y sostenibilidad de los esfuerzos de manejo forestal.

Investigar y aplicar tecnologías innovadoras para el manejo de la densidad forestal es otra área crítica de desarrollo. El uso de sensores remotos, como drones y satélites, permite la recolección de datos precisos y actualizados sobre la estructura y salud del bosque. Estos datos pueden integrarse en modelos de simulación que ayudan a predecir los impactos de diferentes intervenciones de manejo y a planificar acciones correctivas de manera más efectiva. Además, las tecnologías innovadoras pueden facilitar la detección temprana de problemas como plagas, enfermedades e incendios, mejorando la capacidad de respuesta y mitigación.

Monitoreo y Evaluación

Implementar programas de monitoreo y evaluación es esencial para seguir el impacto de las acciones correctivas en la densidad y resiliencia del bosque. Estos programas deben incluir la recolección sistemática de datos sobre diversos indicadores ecológicos y de salud del bosque, como la tasa de crecimiento de los árboles, la incidencia de plagas y enfermedades, y la biodiversidad. El seguimiento continuo permite detectar cambios y tendencias a lo largo del tiempo, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas.

Utilizar los datos recopilados en los programas de monitoreo para ajustar y mejorar las prácticas de manejo es un componente crucial de un enfoque adaptativo. Conforme se obtienen nuevos conocimientos y se identifican áreas de mejora, las estrategias de manejo pueden refinarse para maximizar su efectividad. Este ciclo de retroalimentación constante asegura que las prácticas de manejo forestal se mantengan relevantes y efectivas frente a las condiciones cambiantes del bosque y el entorno.

3.1.1.4. CONCLUSIONES

Los bosques de pino en Honduras son vitales para la biodiversidad y el bienestar de las comunidades rurales, desempeñando roles cruciales en la regulación climática y la prevención de la erosión del suelo. Sin embargo, estos bosques enfrentan serias amenazas como la deforestación, la degradación del suelo, los incendios forestales, las plagas y el cambio climático, lo que resalta la necesidad de estrategias de manejo forestal efectivas.

Las "Directrices para Aplicar Acciones Correctivas e Inducir la Resiliencia Según las Densidades en los Bosques de Pino Afectados en Honduras" ofrecen un marco estratégico para abordar estos desafíos, enfocándose en la evaluación precisa de la densidad forestal, la implementación de acciones correctivas adaptadas y la participación comunitaria. La integración de tecnologías avanzadas como drones y sistemas de información geográfica (SIG), junto con la clasificación de densidades y la adopción de prácticas de silvicultura adaptativa, son fundamentales para la gestión sostenible de estos ecosistemas.

Además, las directrices destacan la importancia de la educación y la capacitación comunitaria, así como el fortalecimiento del marco normativo y la gobernanza. La colaboración interinstitucional y las alianzas estratégicas con organizaciones internacionales son esenciales para asegurar el financiamiento y los recursos necesarios.

La implementación efectiva de estas directrices no solo busca mitigar los impactos actuales, sino también construir una base sólida para la resiliencia futura de los bosques de pino en Honduras, garantizando su sostenibilidad a largo plazo y el bienestar de las generaciones venideras.

4. PRODUCTO 3. METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE RESILIENCIA DEL BOSQUE DE PINO.

4.1. METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE RESILIENCIA DEL BOSQUE DE PINO.

4.1.1. INTRODUCCIÓN

La resiliencia de los ecosistemas forestales es un tema crucial para la gestión y conservación de los bosques, especialmente aquellos que enfrentan amenazas persistentes como plagas y enfermedades. En Honduras, los bosques de pino (*Pinus spp.*) han sido gravemente afectados por el gorgojo descortezador (*Dendroctonus spp.*), una plaga que ha demostrado tener un impacto devastador en la salud y sostenibilidad de estos ecosistemas. Evaluar la capacidad de recuperación de los bosques de pino ante el ataque de este insecto es esencial para desarrollar estrategias de manejo forestal que promuevan la resiliencia y sostenibilidad a largo plazo.

La resiliencia del ecosistema se define como la capacidad de un sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse mientras mantiene esencialmente las mismas funciones, estructura, identidad y retroalimentación. En el contexto de los bosques de pino afectados por el gorgojo descortezador, la resiliencia se puede medir observando la recuperación de la densidad de los árboles y la restauración de las funciones ecológicas después del brote de la plaga.

El objetivo principal de este informe metodológico es detallar el proceso utilizado para evaluar la capacidad de recuperación del bosque de pino en función de la densidad de los árboles y su correlación con diversas variables biofisiográficas. Estas variables incluyen factores climáticos, edáficos (relacionados con el suelo), topográficos y paisajísticos, que juntos pueden influir en la resiliencia del bosque.

4.1.2. METODOLOGÍA

4.1.2.1. Selección y Pre-procesamiento de Imágenes

Las imágenes multiespectrales utilizadas en este estudio se obtuvieron de la plataforma USGS Earth Explorer, abarcando los satélites Landsat 5, 7 y 9. La selección de imágenes se realizó para el periodo comprendido entre los años 2003 y 2023, con el fin de obtener una serie temporal adecuada que permita evaluar los cambios en la vegetación a lo largo del tiempo.

Selección de Imágenes: Se priorizaron imágenes con la menor cantidad de cobertura nubosa para asegurar la calidad y precisión de los análisis. Se seleccionaron dos imágenes por año para abarcar completamente el territorio de interés, lo que permitió una cobertura exhaustiva y detallada de las áreas estudiadas.

Corrección de Anomalías: Las imágenes de Landsat 7 presentaban líneas de error debido a un fallo del sensor conocido como "Scan Line Corrector (SLC)". Estas anomalías se corrigieron utilizando técnicas estándar de procesamiento de imágenes, tales como el método de interpolación y el uso de algoritmos de relleno de huecos, para asegurar la integridad de los datos.

Pre-procesamiento: Las imágenes seleccionadas fueron sometidas a un pre-procesamiento que incluyó correcciones radiométricas y geométricas para ajustar las diferencias en la reflectancia debido a la atmósfera y la geometría de adquisición. Este proceso es esencial para normalizar las imágenes y permitir comparaciones precisas a lo largo del tiempo.

4.1.2.2. Cálculo de Índices de Vegetación

Una vez corregidas y seleccionadas las imágenes, se procedió a calcular diversos índices de vegetación utilizando la calculadora de ráster en QGIS. Los índices seleccionados son fundamentales para evaluar la densidad y salud de la vegetación, así como para minimizar los efectos de factores externos como el suelo y la atmósfera. Los índices calculados fueron:

NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada): Este índice se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

donde NIR es la reflectancia en el infrarrojo cercano y Red es la reflectancia en la banda roja. El NDVI es ampliamente utilizado para medir la densidad de la vegetación y su salud, proporcionando valores que varían entre -1 y 1, donde valores más altos indican una mayor densidad y salud de la vegetación.

GCI (Índice de Clorofila Verde): El GCI se calcula con la fórmula:

$$\text{GCI} = \text{NIR} / (\text{Green} - 1)$$

donde Green es la reflectancia en la banda verde. Este índice se utiliza para monitorear la estacionalidad o el estrés ambiental de las plantas, proporcionando una medida de la cantidad de clorofila presente en la vegetación.

ARVI (Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera): El ARVI se calcula como:

$$\text{ARVI} = ((\text{NIR} - (\text{Red}) + \text{Blue})) / ((\text{NIR} + (\text{Red}) - \text{Blue}))$$

donde Blue es la reflectancia en la banda azul. Este índice se utiliza para evaluar la vegetación reduciendo el efecto de la atmósfera en las imágenes, mejorando así la precisión de las mediciones en condiciones atmosféricas variables.

4.1.2.3. Área de Estudio y Diseño de Investigación

El área de estudio comprende zonas diversas de Honduras afectadas por la plaga del gorgojo descortezador. Se categorizaron los parches de bosque según su forma y tamaño, utilizando un análisis Cluster con el algoritmo K-means. Las categorías de los parches son: pequeño moderadamente circular, mediano moderadamente circular, grande moderadamente circular, pequeño alargado, mediano alargado, grande alargado, pequeño muy alargado, mediano muy alargado y grande muy alargado.

4.1.2.4. Muestreo

Se establecieron 27 puntos de muestreo (áreas afectadas por la plaga del gorgojo), replicados para contar con testigos (áreas no afectadas), resultando en 54 puntos totales. En cada punto se midieron variables bioclimáticas, topográficas, paisajísticas, fenológicas y socioeconómicas.

4.1.2.5. Análisis Estadístico

Se evaluó la correlación entre variables dependientes (índices de vegetación) e independientes (precipitación, temperatura, distancia a ríos, pendiente, etc.) utilizando el test de correlación de Spearman y la prueba de Kruskal-Wallis para la variable categórica tipo de parche. Además, se realizó un análisis de discriminación y un análisis clúster para agrupar los sitios según sus características.

Para la comparación entre los parches afectados y los testigos, se realizó un Análisis de Varianza con la finalidad de evaluar si existe diferencia entre las medias de los valores de la media de los índices de vegetación.

5. PRODUCTO 4: MODELO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE RESILIENCIA DEL BOSQUE DE PINO ANTE EL ATAQUE DE LA PLAGA DEL GORGOJO EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD Y COMPOSICIÓN FLORÍSTICA.

5.1. MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE RESILIENCIA DEL BOSQUE DE PINO ANTE EL ATAQUE DE LA PLAGA DEL GORGOJO, EN FUNCIÓN DE SU DENSIDAD Y COMPOSICIÓN FLORÍSTICA.

El modelo de regresión múltiple para la evaluación de los niveles de resiliencia se puede formular de la siguiente manera (este Script está configurado para ejecutarlo en el ambiente de RStudio):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \text{Densidad}_i + \beta_2 \text{Composición}_i + \beta_3 \text{Tipo_afectación}_i + \dots + \beta_p X_{pi} + \epsilon_i$$

Y_i :

Descripción: La variable dependiente para el i -ésimo punto de muestreo.

Significado: Representa el valor de la media de los índices que estamos tratando de predecir o explicar mediante el modelo.

β_0 :

Descripción: Intercepto del modelo.

Significado: Es el valor esperado de Y_i cuando todas las variables independientes son iguales a cero. Actúa como una constante que ajusta el modelo a la realidad observada.

β_1 :

Descripción: Coeficiente de regresión para la variable Densidad.

Significado: Representa el cambio esperado en Y_i por cada unidad adicional de densidad del bosque (número de árboles por hectárea), manteniendo constantes las demás variables.

Densidad_i :

Descripción: Variable independiente que representa la densidad del bosque para el i -ésimo punto de muestreo.

Significado: Número de árboles por hectárea en el bosque de pino.

β_2 :

Descripción: Coeficiente de regresión para la variable Composición.

Significado: Representa el cambio esperado en Y_i por cada unidad adicional en la composición florística (porcentaje de especies de pino vs. otras especies), manteniendo constantes las demás variables.

Composición_i :

Descripción: Variable independiente que representa la composición florística para el i -ésimo punto de muestreo.



Significado: Porcentaje de especies de pino en comparación con otras especies en el bosque.

β_3 :

Descripción: Coeficiente de regresión para la variable Tipo_afectación (A ó T).

Significado: Representa el cambio esperado en Y_i asociado con la presencia o ausencia del gorgojo descortezador, manteniendo constantes las demás variables.

Tipo_afectación_i:

Descripción: Variable independiente que indica si el i-ésimo punto de muestreo ha sido afectado por el gorgojo descortezador.

Significado: Presencia o ausencia de la plaga del gorgojo descortezador en el bosque.

β_p :

Descripción: Coeficiente de regresión para la p-ésima variable independiente.

Significado: Representa el cambio esperado en Y_i por cada unidad adicional de la p-ésima variable independiente (X_{pi}), manteniendo constantes las demás variables.

X_{pi} :

Descripción: Variables independientes adicionales para el i-ésimo punto de muestreo.

Significado: Otras variables biofisiográficas que pueden influir en la resiliencia del bosque (precipitación, temperatura, distancia a ríos, pendiente, elevación, distancia a poblados, forma del parche, tamaño del parche, etc.).

ϵ_i :

Descripción: Término de error para el i-ésimo punto de muestreo.

Significado: Representa la variabilidad en Y_i que no puede ser explicada por las variables independientes en el modelo. Este término captura el efecto de factores no incluidos en el modelo o el error aleatorio.

Modelo adecuado para la interfaz de RStudio.

Estas son las librerías que se sugiere usar para el modelo

```
library(readr)
```

```
library(dplyr)
```

```
library(car)
```

```
# #Cargar los datos correspondientes a las
```

```
##variables a evaluar (independientes y dependientes)
```

```
data <- read_csv("la base de datos con las variables")
```

```
# Ver las primeras filas de los datos
```

```
head(data)
```

```
#####
```

```
###Crear el Modelo de Regresión Múltiple###
```

```
#####
```

```
# Crear el modelo de regresión múltiple para NDVI
```

```
model_IndexMean <- lm(IndexMean ~ Densidad + Composicion_floristica +
```

```
Tipo_afectacion + Precipitacion + Temperatura_max + Temperatura_min +
```

```
Distancia_rios + Pendiente + Elevacion + Distancia_poblados +
```



```
Forma_parche + Tamano_parche, data = Base_datos)
```

```
# Resumen del modelo (visualizar los estadísticos del modelo)
summary(model_IndexMean)
```

```
#####
###Evaluar el Modelo#####
#####
```

```
# Evaluación del modelo IndexMean
pred_IndexMean <- predict(model_IndexMean, Base_datos)
mse_IndexMean <- mean((Base_datos$meanindex - pred_meanindex)^2)
r2_ndvi <- summary(model_IndexMean)$r.squared
```

```
cat("IndexMean Model - MSE:", mse_IndexMean, "R2:", r2_IndexMean, "\n")
```

```
#####
###Validación del Modelo#####
#####
```

```
# División de los datos en entrenamiento (70%) y prueba (30%)
set.seed(42)
train_IndexMean <- sample(1:nrow(Base_datos), 0.7 * nrow(Base_datos))
train_data <- Base_datos[train_index, ]
test_data <- Base_datos[-train_index, ]
```

```
# Ajustar el modelo en los datos de entrenamiento
model_IndexMean_train <- lm(meanindex ~ Densidad + Composicion_floristica +
  Tipo_afectacion + Precipitacion + Temperatura_max + Temperatura_min +
  Distancia_rios + Pendiente + Elevacion + Distancia_poblados +
  Forma_parche + Tamano_parche, data = train_data)
```

```
# Predicciones en los datos de prueba
pred_IndexMean_test <- predict(model_IndexMean_train, test_data)
mse_IndexMean_test <- mean((test_data$meanindex - pred_IndexMean_test)^2)
r2_IndexMean_test <- 1 - sum((test_data$meanindex - pred_IndexMean_test)^2) /
sum((test_data$meanindex - mean(test_data$meanindex))^2)
```

```
cat("meanindex Test Data - MSE:", mse_IndexMean_test, "R2:", r2_IndexMean_test, "\n")
```