



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

**Desarrollo de un modelo para la identificación de áreas con riesgo de ataque
del gorgojo descortezador de pino (*Dendroctonus adjunctus*) en los
departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de
Posgrado como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

En Mitigación y Adaptación al Cambio Climático


Melvin Estuardo Navarro González

Turrialba, Costa Rica, 2018

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

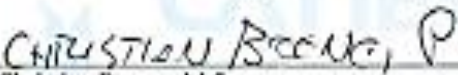
**MAGISTER SCIENTIAE EN MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN
AL CAMBIO CLIMÁTICO**

FIRMANTES:




Bastian Louman, Ph.D.
Codirector de tesis


Pablo Imbach, Ph.D.
Codirector de tesis




Christian Brenes, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Emily Rung, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Isabel A. Gutiérrez-Moctes, Ph.D.
Decana Programa de Posgrado



Melvin Estuardo Navarro González
Candidato

DEDICATORIA

*A Dios;
por ser guía y luz en mi camino durante toda mi vida.
El temor de Jehová es el principio de la sabiduría
y el conocimiento del Santísimo es la inteligencia.*

*A mis padres;
Melvin Navarro y Silvia González,
por su apoyo incondicional, sobretodo,
por el amor que me han brindado, los amo.*

*A mis hermanas;
Claudia, Silvia y Ana Lucía,
que Dios las bendiga y guarde siempre.
Las amo demasiado.*

*A mi bella Guatemala;
mi patria amada.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso, por su apoyo incondicional durante mi estancia en Costa Rica, por darme la sabiduría necesaria para salir adelante.

Al Proyecto "Fortalecimiento de la agricultura y el desarrollo rural mediante educación para el liderazgo", que a través del fondo Henry A. Wallace Legacy Scholar, financiado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), me brindaron la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A mis codirectores Ph.D. Bastiaan Louman y Ph.D. Pablo Imbach, por sus enseñanzas durante mi estancia en CATIE y su apoyo incondicional para este proyecto de investigación.

A M.Sc. Emily Fung, M.Sc. Christian Brenes, por sus enseñanzas, apoyo incondicional y disposición de tiempo para apoyarme en el proceso, muchas bendiciones para ambos.

A M.Sc. Sergio Vílchez, por su apoyo valioso durante el proceso, por sus enseñanzas y su valiosa amistad.

Al cuerpo de profesores de CATIE, personal de la escuela de posgrado de CATIE, personal de la Biblioteca Orton, por todo el apoyo, la amistad y las valiosas enseñanzas.

A todos mis amigos y amigas de la promoción 2016-2017, especialmente: Carlos Rodríguez, Jesua Reyna, Pablo Chacón, José Godoy, Grace Cobos, Joaquín Rodríguez. Dios los bendiga a cada uno, gracias por su valiosa amistad.

ÍNDICE

RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN Y SÍNTESIS GENERAL DE LA TESIS.....	1
1.1 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.	3
1.2 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	3
1.3 MARCO REFERENCIAL	4
1.4 RESULTADOS	17
1.5 PRINCIPALES CONCLUSIONES.....	20
1.6 BIBLIOGRAFÍA.....	21
CAPÍTULO II.....	26
ARTÍCULO I. Identificación de áreas de bosque susceptibles a infestaciones de <i>D. adjunctus</i> en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala.....	26
RESUMEN	26
ABSTRACT	27
1.1 INTRODUCCIÓN.....	28
1.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
1.2.1 Área de estudio	29
1.2.2 Mapeo de zonas infestadas por <i>Dendroctonus adjunctus</i>	30
1.2.3 Datos climáticos, biofísicos y topográficos.	31
1.2.4 Elaboración de base de datos climáticos y biofísicos para el modelo.	32
1.2.5 Árboles de clasificación y regresión (Random Forest).....	33
1.2.6 Generación de ausencias.....	34
1.2.7 Selección de variables más importantes para el modelo final.	34
1.2.8 Reglas de decisión	34
1.2.9 Generación de mapas finales.....	34
1.3 RESULTADOS	35
1.3.1 Dinámica de <i>Dendroctonus adjunctus</i> en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán para el periodo 2004-2016.	35
1.3.2 Principales variables climáticas asociadas al desarrollo de <i>D. adjunctus</i> en la zona de estudio.	36
1.3.3 Variables climáticas y biofísicas más importantes usadas para el modelo de probabilidad de presencia del gorgojo descortezador.	38
1.3.4 Generación de ausencias para el modelo.....	39
1.3.5 Reglas de decisión.....	39
1.3.6 Distribución actual potencial de <i>D. adjunctus</i> en Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala.	40

1.4 DISCUSION	41
1.4.1 Dinámica de <i>Dendroctonus adjunctus</i> en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán para el periodo 2004-2016.	41
1.4.2 Principales variables climáticas asociadas al desarrollo de <i>D. adjunctus</i> en la zona de estudio.	41
1.4.3 Variables climáticas y biofísicas más importantes según el modelo de probabilidad de presencia del gorgojo descortezador	44
1.4.4 Distribución actual potencial de <i>D. adjunctus</i> en Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala.	45
1.4.5 Error de estimación del modelo.	45
1.5 CONCLUSIONES	46
1.6 RECOMENDACIONES	47
1.7 BIBLIOGRAFÍA.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estados de desarrollo del gorgojo del pino, el ciclo de vida dura de 4 a 6 semanas dentro del árbol.....	6
Figura 2. Etapas de colonización de <i>Dendroctonus</i> sp.	8
Figura 3. Daños causados por el gorgojo descortezador del pino al árbol hospedero.....	14
Figura 4. Fases de expansión de <i>D. adjunctus</i>	16
Figura 5. Evolución de las infestaciones de <i>D. adjunctus</i> en Quetzaltenango y Totonicapán.	18
Figura 6. Áreas afectadas por <i>D. adjunctus</i> para el periodo 2004-2016.	18
Figura 7. Distribución actual de <i>D. adjunctus</i> en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán.	20
Figura 8. Ubicación del área de estudio, departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala.....	30
Figura 9. Áreas totales de <i>Pinus rudis</i> afectadas por <i>D. adjunctus</i> en Quetzaltenango y Totonicapán para los años 2004 a 2016.	35
Figura 10. Valores de Índice Oceánico del Niño registrados para Guatemala.	36
Figura 11. Lluvia acumulada de 2 meses antes de inicio de infestación, para la zona de estudio..	37
Figura 12. Temperatura media del mes de mayor infestación.	38
Figura 13. Variables finales más importantes utilizadas en el modelo.	38
Figura 14. Reglas de decisión utilizadas para la generación de los modelos de probabilidad de ocurrencia del gorgojo descortezador.....	40
Figura 15. Áreas de bosque con probabilidad de ocurrencia de infestaciones de <i>D. adjunctus</i> para los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán.....	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Diferencias y similitudes de <i>D. adjunctus</i> y <i>D. frontalis</i>	17
Cuadro 2. Variables climáticas y biofísicas relacionadas con las infestaciones de <i>D. adjunctus</i> en Quetzaltenango y Totonicapán.....	19
Cuadro 3. Rangos de variables climáticas y biofísicas con mayor probabilidad de presencia de <i>D. adjunctus</i>	19
Cuadro 4. Cuadro descripción de variables climáticas y biofísicas utilizadas en el estudio.	31
Cuadro 5. Estructura de base de datos creada para la modelación.....	32
Cuadro 6. Matriz de confusión del modelo.....	39
Cuadro 7. Modelo final: mayor probabilidad de ocurrencia del gorgojo descortezador de pino.	39

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

CONADEH: Comisionado Nacional de los Derechos Humanos

CONAP: Consejo Nacional de Áreas Protegidas

ECOSUR: El Colegio de la Frontera Sur

ENSO: El Niño Southern Oscillation

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

IARNA: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente

ICF: Instituto de Conservación Forestal

IMN: Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica

INAB: Instituto Nacional de Bosques

INE: Instituto Nacional de Estadística

INSIVUMEH: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología

MAGA: Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

ONI: Oceanic Niño Index

URL: Universidad Rafael Landívar

USAC: Universidad de San Carlos de Guatemala

USDA: United States Department of Agriculture

RESUMEN

El estudio se realizó en el área de bosques de coníferas de los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, ubicados en la región del Altiplano Occidental de Guatemala. La zona de estudio abarca un total de 1 216 km² que incluye 18 municipios de Quetzaltenango y 6 municipios de Totonicapán. Los bosques de coníferas de estos departamentos, en su mayoría, están representados por el pino colorado (*Pinus rudis*) mismo que es el hospedero de la principal plaga de la región: el gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus adjunctus*).

Tomando como periodo base los años 2004 a 2016, se parte de la identificación y mapeo de las áreas de bosque de coníferas afectadas durante este periodo de tiempo. Se contabilizan 810 focos de infestación, lo que representa un área total de 1,169 hectáreas de *Pinus rudis*. Estos datos fueron obtenidos por medio de los registros proporcionados por el Instituto Nacional de Bosques (INAB), mismos que fueron validados a través del uso de imágenes satelitales Landsat 7 y 8, así como la plataforma de Google Earth Pro., que fue utilizada para tener una mejor apreciación de las áreas de bosque, especialmente aquellas que no son visibles en las imágenes Landsat.

A partir de cada polígono (810 registros) se extrae información climática de variables como: precipitación, temperatura, velocidad del viento, el Niño Oscilación del Sur (ENSO), y variables biofísicas y topográficas como elevación, pendiente, distancia a carreteras o caminos, densidad de incendios. Esta base de datos se utiliza para crear modelos de regresión que expliquen la incidencia de cada una de estas variables en el desarrollo de *Dendroctonus adjunctus* en la región. Para cada variable se extraen las de mayor peso según los modelos de regresión siendo estas: temperatura media registrada en el mes de inicio de infestación, precipitación acumulada 2 meses antes del inicio de la infestación, velocidad del viento, ENSO 2 meses antes de la infestación, elevación, distancia a carreteras y por último, incendios.

A partir de estas variables finales se obtienen modelos (reglas de decisión) que representan los escenarios donde existe mayor probabilidad de presencia del gorgojo descortezador dentro de los bosques de coníferas de los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, en la actualidad.

Palabras clave: pino colorado, plaga, gorgojo descortezador, modelos de regresión, reglas de decisión, escenarios.

ABSTRACT

The study was conducted in the coniferous forest area of the departments of Quetzaltenango and Totonicapán, located in the Western Highlands region of Guatemala. The study area covers a total of 1,216 km² that includes 18 municipalities of Quetzaltenango and 6 municipalities of Totonicapán. The coniferous forests of these departments are mostly represented by the red pine (*Pinus rudis*) which is the host of the main pest in the region: the pine bark beetle (*Dendroctonus adjunctus*).

Taking the years 2004 to 2016 as a base period, we start with the identification and mapping of the coniferous forest areas affected during this period. There are 810 outbreaks of infestation, representing a total area of 1,169 hectares of *Pinus rudis*. These data were obtained through the records provided by the National Forest Institute -INAB-, which were validated using Landsat 7 and 8 satellite images as well as the Google Earth Pro platform that was used to have a better appreciation of forest areas, especially those that are not visible in Landsat images.

From each polygon (810 records) climatic information is extracted from variables such as: precipitation, temperature, wind speed, the Niño Southern Oscillation (ENSO), and biophysical and topographic variables such as elevation, slope, distance to roads or paths, density of fires. This database is used to create regression models that explain the incidence of each of these variables in the development of *Dendroctonus adjunctus* in the region. The variable with the greatest influence are obtained according to the regression models, being these: Average temperature registered in the month of the beginning of infestation, accumulated precipitation 2 months before the beginning of the infestation, wind speed, ENSO 2 months before the infestation, elevation, distance to roads and finally fires.

From these final variables we obtain models (decision rules) that represent the scenarios where there is a greater probability of presence of the bark beetle within the coniferous forests of the departments of Quetzaltenango and Totonicapán, at present.

Key Words: *Pinus rudis*, plague, bark beetle, regression models, decision rules, scenarios.

INTRODUCCIÓN Y SÍNTESIS GENERAL DE LA TESIS

Centro América cuenta con aproximadamente 3.8 millones de hectáreas de pinos nativos (*Pinus spp*). Estos bosques han estado sometidos mucho tiempo a las amenazas de diversos agentes destructivos como huracanes, sequías, incendios, actividades humanas y plagas forestales. La combinación de estos factores ha producido en años recientes efectos negativos sobre los recursos forestales de la región (FAO 2001).

Todas estas amenazas actuando de forma individual o en conjunto, en los últimos años, han provocado el debilitamiento de los bosques de coníferas de la región, lo que ha propiciado un ambiente idóneo para brotes de plagas forestales, tales como las del género *Dendroctonus*.

Los bosques de coníferas, en asociación con especies de latifoliadas, son muy importantes en Centroamérica, ya que son un proveedor natural de madera de calidad y fuente de combustible (CATIE 1985).

El mapa de cobertura forestal de Guatemala, para el año 2012, estimó la cobertura forestal en 3,711,366 hectáreas, correspondientes a un 34% del territorio natural. Los bosques de coníferas tienen una superficie de 298,982 hectáreas que corresponden al 2.76% de la superficie forestal del país (INAB, CONAP 2015).

Los departamentos con mayor cobertura forestal son: Petén, Alta Verapaz, Izabal, Huehuetenango y Quiché. Los departamentos de Huehuetenango, San Marcos y Quiché poseen la mayor parte de coníferas (61%). (IARNA 2004)

Los recursos genéticos del género *Pinus* son de los más importantes para Guatemala, debido a que las especies de pino son de las más empleadas por el Sector Forestal, para su comercialización y exportación, como por las comunidades rurales para obtener leña (INAB, IARNA-URL 2012).

Se estima que el 95.3% de la población rural utiliza leña como recurso energético, estimándose un consumo de 2.7 m³/persona/año (IARNA-URL 2012).

Los factores más importantes que ocasionan una fuerte presión sobre los recursos forestales de Guatemala son los siguientes:

- i) la deforestación, la cual ha causado la pérdida de los bosques del país desde 1950.
- ii) incendios forestales la mayoría han originados por actividades agropecuarias (habilitación de tierras para la agricultura y quema de pastos) en áreas de avance de frontera agrícola principalmente.
- iii) ataque de plagas y enfermedades. (IARNA 2004)

Según estudios realizados por CATIE (1991), en América Central se ha reportado la presencia de seis especies de *Dendroctonus*, a saber: *D. frontalis*, *D. adjunctus*, *D. approximatus*, *D. valens*, *D. parallelocolis* y *D. vitei*, de las cuales todas atacan árboles de pino. Pueden ser halladas también en México y Estados Unidos. Recientemente, se ha descubierto una nueva especie de gorgojo llamado *Dendroctonus mesoamericanus*, que ataca 8 especies diferentes de pinos originarios de Centroamérica. (Armendariz-Toledano et al. 2015)

Históricamente, se conoce que los bosques naturales de pino han sido fuertemente atacados por el gorgojo de pino (*Dendroctonus spp.*), especialmente en los departamentos de Huehuetenango y Petén (IARNA 2004).

En 2000 y 2001, los bosques de pino de una región del departamento de Petén padecieron una fuerte irrupción del gorgojo descortezador, presumiblemente de *Dendroctonus frontalis*. Perecieron casi 3.000 hectáreas existentes de *Pinus caribaea* (Billings y Schmidtke 2002). Según datos de expertos del INAB, el área afectada representaba un 32% de bosques puros de coníferas en Petén. En cuanto a los daños económicos, los costos de reposición de esas plantaciones fueron de aproximadamente 20 millones de quetzales, sin considerar la pérdida de material genético, los medios de vida de las personas que dependen de estos bosques y los servicios ambientales que dicho bosque prestaba a la sociedad guatemalteca (Castañeda 2001).

Dendroctonus es una de las plagas más importantes en los bosques y plantaciones de Guatemala. Esto debido a que durante y después de su ataque, reduce el valor de la madera en pie, en especial donde el monitoreo y control son difíciles de aplicar, tomando en cuenta el alto costo que representa (Sosa 2005).

Para tener un mejor control sobre el estado de los bosques de coníferas es importante conocer cada una de las etapas del ataque de la plaga, por ejemplo, Billings et al (1990), menciona que es muy importante reconocer las fases de ataque del gorgojo descortezador, ya que puede ser la base para definir objetivos de control y monitoreo, con la finalidad de contrarrestar los efectos producidos por la plaga.

En Guatemala se han realizado esfuerzos para monitorear los recursos forestales del país, con el apoyo de FAO (1988), INAB y MAGA (1999), Universidad del Valle de Guatemala (2000), se han elaborado mapas de la cobertura forestal hasta el año 2001, posteriormente, a partir del año 2006 se iniciaron negociaciones para continuar con proyectos de monitoreo de los bosques del país. No obstante, a pesar de estos esfuerzos, no cuentan con información necesaria para llevar a cabo un monitoreo a escala nacional que permita conocer el estado de los bosques. Por otra parte, existe un vacío de información en la parte de modelaje para determinar áreas potenciales con riesgo a ataques del gorgojo descortezador.

Es importante crear un punto de partida para el correcto monitoreo de los bosques de coníferas del país, especialmente de aquellos bosques que son de importancia económica

para la población, tal es el caso, de los bosques de *Pinus rudis* en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán.

Para lograr esto, se desarrolla un modelo que permita conocer las áreas más vulnerables a ser infestadas por el gorgojo descortezador en los departamentos antes mencionados. A partir de la identificación de las áreas afectadas en los años 2004 al 2016, se realizó un análisis de las principales variables climáticas y biofísicas que están fuertemente correlacionadas con el desarrollo de la plaga en la región.

1.1 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Dendroctonus adjunctus es una de las plagas más destructivas en los bosques de coníferas de la región del Altiplano Occidental de Guatemala. Los primeros daños registrados se reportaron desde el año de 1895 hasta la actualidad. El ciclo de apareamiento de la plaga está entre 15 y 20 años, siendo su principal hospedero los bosques de pino colorado (*Pinus rudis*), que es una especie nativa y predominante en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán (Castañeda 1980).

En la región del Departamento de Petén, el costo de recuperación de 3000 hectáreas de bosques de coníferas afectadas en el año 2000 y 2001, se estimó en 20 millones de Quetzales.

Los bosques de pino de Quetzaltenango y Totonicapán han sido seriamente afectados por *D. adjunctus* durante el periodo 2004 al 2016. Debido a la importancia económica y ambiental que presentan los bosques de coníferas para la población de dichos departamentos, es necesario contar con una herramienta que permita realizar un adecuado monitoreo de los bosques de la región, con el objetivo de generar medidas preventivas y evitar la pérdida de los mismos.

1.2 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Objetivo general:

Desarrollar un modelo para la identificación de áreas con riesgo de ataque del gorgojo descortezador de pino (*Dendroctonus adjunctus*) en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala.

Objetivos específicos:

Identificar y mapear áreas afectadas por la plaga del gorgojo descortezador de pino durante el periodo 2004-2016.

- a) ¿Cuál fue la evolución de *D. adjunctus* durante el periodo de tiempo sujeto de estudio?

- b) ¿Cuáles son las principales características de las infestaciones causadas por *D. adjunctus*?
- c) ¿Cuántos focos de infestación se detectaron en el periodo de tiempo sujeto de estudio?
- d) ¿Qué departamento fue el más afectado por *D. adjunctus*?

Desarrollar un modelo con capacidad de predicción espacial de áreas susceptibles a ataques del gorgojo descortezador de pino en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala.

- a) ¿Qué variables influyen más en la capacidad predictiva del modelo?
- b) ¿Qué departamento tiene más probabilidad de ser afectado por *D. adjunctus*?

1.3 MARCO REFERENCIAL

Historia de vida y hábitos del gorgojo de pino (*Dendroctonus adjunctus*)

Los escarabajos descortezadores pertenecen al orden Coleoptera familia Scolytidae, reciben el nombre de gorgojo de pino en la mayor parte de Centroamérica (Billings y Espino 2005). Los escarabajos habitan de manera natural en los bosques de coníferas, siendo parte del funcionamiento del ecosistema (Wood 1982). El papel de estos insectos en el ecosistema es principalmente para regular la estructura de comunidades de plantas, contribución a la biodiversidad, adelgazamiento del dosel, a la estructura del suelo y patrones de sucesión (Raffa et al. 2015).

Generalmente, las poblaciones de estos escarabajos dependen de la influencia de la temperatura. Esto implica alteraciones en la dinámica poblacional, tanto negativa como positivamente; por ejemplo, un excesivo calentamiento y condiciones de sequía, así como tormentas severas, incrementan el estrés del árbol, lo que hace que sean vulnerables a la colonización por descortezadores (Lombardero et al. 2000).

La sequía prolongada es uno de los factores que influyen el rápido desarrollo de las poblaciones de *D. frontalis*. Según expertos del Instituto de Conservación Forestal (ICF) de Honduras, recientemente los bosques de Honduras han sido devastados por esta plaga, sin embargo, con el inicio de la temporada de lluvias los ataques disminuyeron considerablemente. Esto está muy asociado a que los árboles fortalecen su sistema de defensa ante los ataques de esta plaga.

En algunas ocasiones, el clima extremo junto con otros factores abióticos de estrés o bien un inadecuado manejo, influye en la susceptibilidad de los pinos y juega un rol en la dinámica de brotes de plagas (Cuellar et al. 2013).

Dendroctonus adjunctus es un descortezador que ataca los bosques de coníferas que se encuentran por encima de los 2800 msnm. Generalmente, los huevos son ovalados y de color

blanco, miden aproximadamente 0.15 cm de largo y ancho. La larva es corrugada en forma de "C". Dependiendo del instar en que se encuentre la larva, puede variar sus dimensiones de 1.5 mm a 4.33 mm. Las pupas son de coloración cremosa, en la cual se observan las características de los adultos como los élitros, patas y antenas midiendo 0.6 mm de largo y 0.4 mm de ancho. (USDA 2013)

El insecto adulto tiene una longitud de 2.9 a 6.6 mm con un promedio de 5.4 mm, el color es negro o café oscuro cuando ha alcanzado la madurez. (USDA 2013)

El gorgojo descortezador de pino ha desarrollado estrategias sofisticadas para poder atacar en masa y debilitar árboles sanos. Una de estas estrategias es gracias a su compleja capacidad de comunicación a través de feromonas (Wood 1982). Estas feromonas liberadas combinadas con el olor a resina de los árboles atrae a miles de escarabajos, que se concentran en atacar hasta debilitar el sistema de defensa del árbol (Billings et al. 2014). Otra característica de este insecto es la capacidad de asociación con hongos mutualistas y fitopatógenos (Paine et al. 1997), gracias a esto las condiciones de estos insectos puede aumentar rápidamente en condiciones adecuadas. Un rápido ciclo de vida de hasta 10 generaciones por año (Payne 1980) hace que esta plaga tenga un potencial destructivo mucho mayor.

El rápido crecimiento de la población de gorgojos puede dar lugar a brotes a gran escala. Los brotes más destructivos dan lugar a la eliminación completa de árboles de pino a través de grandes regiones geográficas. (Costanza et al. 2012)

Ciclo de vida

El gorgojo descortezador de pino es una especie multivoltina con una metamorfosis completa. Esta consta de las fases: huevo, larva, pupa y adulto (Payne 1980). Las hembras adultas ponen huevos a lo largo de galerías construidas en la corteza interior en forma de "S". Las larvas se alimentan de la corteza interna, posteriormente se convierten en crisálidas en las cámaras cerca de la superficie de la corteza. Al emerger del árbol hospedero, los adultos nuevos vuelan en búsqueda de un árbol sano que sirva nuevamente como hospedero. Los adultos solamente sobreviven unos pocos días fuera del árbol (Billings y Espino 2005). Existe evidencia que, a pesar de que estos insectos no logran penetrar la madera, logran introducir un hongo azulado que reduce rápidamente la comercialización de la madera de los árboles atacados (Billings et al. 2014).

Figura 1. Estados de desarrollo del gorgojo del pino, el ciclo de vida dura de 4 a 6 semanas dentro del árbol.



Fuente: Billings y Espino, 2005

El número de generaciones por año varía considerablemente dependiendo de las condiciones climáticas que se presenten (Thatcher 1960).

Para Centro América, *D. adjunctus* es capaz de producir entre 7 a 9 generaciones por año. La longevidad del huevo hasta adulto puede fluctuar entre 26 a 60 días, el desarrollo de huevo a larva puede tardar entre 3 y 11 días, de larva a pupa entre 15 a 40 días y de pupa a adulto entre 5 y 17 días, dependiendo de la estación del año. Los factores bióticos y abióticos y de latitud, influyen en el desarrollo de todos los diferentes estados de vida. (Hernández 2000)

Comportamiento de *D. adjunctus*

El ciclo de vida del gorgojo descortezador del pino lleva todo un proceso secuencial de componentes que culminan en la propagación de la especie. Esta secuencia comienza cuando los adultos emergen de sus árboles hospederos. Vuelan en búsqueda de un nuevo árbol hospedero, atravesando la corteza y comienzan de nuevo la construcción de galerías en los tejidos del floema. Justo antes de comenzar la actividad de perforación de la corteza, los adultos liberan feromonas atrayentes (atrayentes secundarios). Una vez percibidas las feromonas, así como los olores liberados por los árboles recién atacados, provoca que más escarabajos lleguen al árbol que está siendo atacado. Como resultado de este comportamiento de atracción y agregación el árbol termina siendo atacado con éxito, para lo cual se da paso al proceso de apareamiento, construcción de galerías para huevos y nuevamente se completa el ciclo de este insecto (Payne 1980).

En términos generales, las actividades principales del gorgojo descortezador se pueden clasificar ampliamente en: selección del hospedero, agregación, colonización, reemergencia, emergencia, dispersión e hibernación (Vité y Francke 1976).

Actividades del gorgojo descortezador

Selección del hospedero

Ataque inicial

Conceptualmente, la selección inicial se atribuye a los esfuerzos de los escarabajos que inician el ataque a los árboles hospederos susceptibles. A estos escarabajos se les conoce como pioneros (Borden 1974). El papel de los escarabajos pioneros es esencial, ya que son quienes deben establecer con éxito un punto focal para la próxima generación. Generalmente, este papel está a cargo de las hembras, ya que ellas son quienes localizan los árboles adecuados para ser hospederos, esto sin la ayuda de ningún tipo de atrayentes (feromonas). Los machos comienzan su papel después que las hembras han seleccionado y atacado con éxito al árbol hospedero, y se ha iniciado la atracción secundaria (liberación de feromonas). La hembra comienza a producir feromonas de agregación cuando entran en contacto con el árbol hospedante (Vité y Crozier 1968).

El proceso de selección del árbol hospedero por parte de los escarabajos aún no está bien definido, lo que si se tiene claro es que la segregación de sustancias químicas junto con una mezcla de terpenos liberados por los árboles hospederos, desempeñan un papel importante para este proceso (Pureswaran et al. 2004).

Durante la fase inicial de la infestación, el escarabajo debe superar la producción de resina del árbol hospedero, ya que esta puede matar o empujar el insecto fuera del árbol. El escarabajo trabaja para atravesar la resina; si este proceso no es exitoso, entonces la supervivencia del escarabajo no es probable (Bunt et al. 1980). Ingresar rápidamente al árbol hospedero es muy importante, ya que disminuye la habilidad del mismo para producir más resina.

Condición del hospedero

La fisiología de los árboles, el sitio y los parámetros de densidad afectan la susceptibilidad del hospedero al ataque y desarrollo del gorgojo descortezador. Los árboles sometidos a estrés como resultado de una alta densidad, enfermedades, rayos, inundaciones, sequías, incendios y daños causados por el viento o daños mecánicos pueden tener causar que los árboles no puedan defenderse exitosamente ante los ataques del insecto (Lorio y Bennett 1974). La sobrepoblación provoca una reducción en el vigor del árbol, debido al incremento de la competencia entre los árboles (Hicks et al. 1978). El pobre vigor de un árbol se expresa en crecimiento radial reducido (Bennet 1968) y se asocia constantemente con infestaciones por gorgojo descortezador (Coulson et al. 1974).

Colonización

La colonización por parte de la plaga consta de las siguientes fases:

- **Agregación**

Una vez que los escarabajos pioneros han seleccionado un árbol hospedero susceptible, comienza la atracción secundaria. Como resultado, otros escarabajos comienzan a agregarse al árbol hospedero. Esta fase en el ciclo de vida del insecto es fundamental ya que con la ayuda de un número suficiente de escarabajos y durante un periodo de tiempo relativamente corto, es posible superar la resistencia natural del árbol. Es poco probable que un solo escarabajo pueda colonizar con éxito un árbol ya que la presión que ejerce la resina sobre el insecto lo lanzaría fuera del árbol. Sin embargo, con múltiples ataques provoca que el árbol se debilite pronto, conduciendo así a una colonización exitosa (Payne 1980).

Los ataques masivos generalmente alcanzan su máximo efecto entre dos o tres días después del ataque inicial y el ataque en sí mismo en aproximadamente cinco días (Paine et al. 1997).

Figura 2. Etapas de colonización de *Dendroctonus sp.*



Fuente: Adaptado en base a Payne 1980

- **Apareamiento**

El apareamiento se lleva a cabo en la cámara nupcial, la cual se encuentra muy cerca del orificio de entrada al árbol hospedero (Payne 1980).

- **Puesta de huevos**

Después del apareamiento, la hembra construye galerías en forma de "S" cerca del cambium, lugar donde serán depositados los huevos (Payne 1980). Después de haber construido 2-3 cm de galerías, la hembra prepara nichos para depositar sus huevos. Se deposita un solo huevo por nicho. (Fronk 1947)

- **Reemergencia**

El gorgojo descortezador reemerge del árbol en 2 formas. Primero, los insectos padres vuelven a salir después de excavar con éxito las galerías y de poner los huevos. La segunda reemergencia es la de la progenie una vez que alcanzan la edad adulta. Bajo condiciones ambientales normales, la entrada y reemergencia de los adultos ocurre durante un período de 14 días y la progenie emerge en 28 días (Coulson et al. 1979). Dependiendo del tiempo en que un escarabajo adulto logró entrar al hospedero durante la fase de agregación, el proceso de reemergencia continuará durante los siguientes 16 a 20 días. Una vez que los escarabajos adultos padres han dejado un hospedero, su papel en el proceso de colonización ha terminado. Sin embargo, siguen teniendo un papel muy importante en el ciclo de infestación, ya que siguen siendo capaces de percibir señales olfativas, atacando a nuevos hospederos, también continua la producción de feromonas, apareamiento y puesta de huevos (Cooper y Stephen 1978).

- **Desarrollo larvario, pupación y adultos**

Los huevos eclosionan en 2 a 9 días después de ser sido puestos (Payne 1980). Las larvas tratan de llegar hasta la corteza interior, donde pasa la mayor parte de su periodo larval. Cuando la larva está casi madura, perfora la corteza interior hasta llegar a la parte exterior de la corteza. Al llegar a la corteza exterior, la larva madura y forma una pupa oblonga. El proceso de maduración sigue hasta alcanzar el desarrollo próximo a adultos (Payne 1980).

La pupa madura se transforma en un adulto inexperto, permaneciendo en la celda pupal hasta que tenga el suficiente endurecimiento y oscurecimiento de la cutícula, durante este proceso sufre diferentes cambios en la coloración hasta obtener el color final de negro-marrón (Payne 1980).

- **Emergencia, dispersión e hibernación**

Una vez que el gorgojo descortezador adulto se ha desarrollado plenamente, comienza a construir un orificio de salida a través de la corteza exterior. Si las condiciones ambientales no son adecuadas, el adulto puede permanecer debajo de la corteza durante algún tiempo. Generalmente, la demora puede ser asociada con una temperatura más fría (Kinn 1978).

Las condiciones ambientales afectan la dispersión del gorgojo, por ejemplo, durante el invierno, los escarabajos emergentes pueden no dispersarse, lo que da lugar a que vuelvan a atacar el mismo árbol hospedero (Thatcher y Pickard 1964).

Factores que influyen en el desarrollo de *D. adjunctus*

Son varios los factores que influyen en el desarrollo de esta plaga, dentro de estos se encuentran los siguientes:

- Factores climáticos de sitio y de terreno

La relación existente entre el gorgojo y el hospedero es un fenómeno ecológico muy complejo. Existen muchas variables que determinan la relación que puede darse entre el gorgojo descortezador y el árbol hospedero, siendo algunas de estas: factores climáticos, características de sitio, variables dasométricas.

Factores climáticos

Lluvia

La cantidad y el momento en que ocurren las lluvias probablemente afecten la actividad del gorgojo, pero no se sabe con exactitud cómo afecta, por ejemplo, la humedad podría afectar directamente a la supervivencia y el vigor de los escarabajos adultos o el desarrollo de los más jóvenes. Indirectamente, puede afectar a las poblaciones de escarabajos a través de la alteración de la resistencia del árbol hospedante (Ray 1980).

Estudios que tratan específicamente sobre el balance hídrico a nivel interno del árbol y la relación con el ataque del gorgojo descortezador muestran resultados interesantes. La presión de exudación de resina en pinos se reduce considerablemente debido a los periodos de estrés hídrico provocados por la sequía. Los autores sostienen que los escarabajos tienen más éxito en el ataque a árboles con exudación de resina baja, lo que les da más probabilidades de no ser expulsados de los árboles (Lorio y Hodges 1968).

En el caso de incendios forestales pueden debilitar a los árboles o matarlos definitivamente. En el caso de los árboles debilitados estos producen menos resina y tienen un sistema de defensa que no resiste a los ataques por parte del gorgojo descortezador (Billings et al. 2014).

En el estado de Nuevo León, México, se llevó a cabo un experimento para conocer la fluctuación poblacional de adultos de gorgojo descortezador (*Dendroctonus mexicanus*) en bosques de coníferas y su correlación con variables de temperatura y precipitación. Por medio de la utilización de índices que combinan la precipitación y temperatura es posible predecir la fluctuación poblacional en este caso de *Dendroctonus mexicanus*. Se obtuvieron valores bajos de esta relación, como resultado de bajas precipitaciones y altas temperaturas, lo que permite obtener un mayor número de insectos. Por otro lado, valores altos de este índice, resultado de altas precipitaciones y bajas temperaturas, provocan una mejor fluctuación de insectos (Cuéllar Rodríguez et al. 2013).

La relación entre la resistencia de los árboles y la producción de resina está directamente relacionada con el balance hídrico del árbol hospedero. Es muy probable que la lluvia tenga un efecto sobre la resistencia del hospedero, sin embargo, aún no es posible cuantificar este

efecto debido a las constantes variaciones en el hospedero, el escarabajo y el clima (Ray 1980).

Temperatura

Uno de los principales efectos de la temperatura está muy asociado con la supervivencia del escarabajo, sin embargo, el efecto potencial de resistencia del hospedero está relacionado con el balance hídrico del árbol. Kalkstein (1976) encontró que la evapotranspiración potencial de los árboles puede ser una herramienta útil para predecir la evolución de la población de escarabajos.

La temperatura es muy importante para las poblaciones del gorgojo descortezador. Logan y Powell (2001) mencionan que la temperatura del floema dentro del pino es más alta que la temperatura ambiente. Esto debido a que la temperatura del floema es resultado de la radiación solar absorbida por la corteza. Esta característica del micro hábitat del gorgojo dentro del árbol hospedero, es muy importante para tomar en cuenta.

Los efectos de la temperatura también pueden estar relacionados con la fisiología y comportamiento del insecto en sus diferentes etapas de desarrollo siendo algunos de estos: en la actividad diaria, reproducción, nutrición, desarrollo y supervivencia de los mismos. Por ejemplo: en zonas templadas, con una temperatura promedio de 10 °C el ciclo de vida tardaría alrededor de 82 días. Por otra parte, en verano con temperaturas promedio de 30 °C el ciclo de vida es de 31 días (Payne 1980).

Logan y Bentz (1999) hacen referencia a tres efectos directos del incremento de la temperatura en la biología del insecto. El primero es la reducción del tiempo necesario entre una generación y la siguiente. Segundo, un aumento en la fecundidad y tercero, una disminución de la mortalidad por causas climáticas.

En un experimento llevado a cabo en Estados Unidos, se evaluó el efecto de la temperatura en la tasa de reproducción del insecto. Las temperaturas fueron a: 23 °C, 25 °C, 26 °C, 32 °C y 33 °C respectivamente. Los resultados muestran que la reproducción del insecto disminuyó a medida que la temperatura iba aumentando, esto posiblemente por consecuencias fisiológicas (Evans et al. 2011).

Estudios recientes sugieren que cambios en temperatura y precipitación influirían directamente en las poblaciones del gorgojo, a través del proceso fisiológico del insecto. Indirectamente, a través de los árboles hospederos y el aumento o disminución de depredadores naturales (Gan 2004).

Perturbaciones de resistencia relacionadas con el clima

Eventos relacionados con el clima tales como tormentas eléctricas, vientos fuertes, granizo, asociado con lluvias, son factores que permiten el inicio del ataque del gorgojo descortezador del pino (Lorio y Yandle 1978).

Estas perturbaciones de resistencia que debilitan los árboles favorecen el ataque inicial del escarabajo estos árboles dañados forman epicentros de los puntos de escarabajos, la

infestación puede aumentar de tamaño en función de la disponibilidad de poblaciones de gorgojo y otras condiciones ambientales presentes al momento del ataque (Ray 1980).

- **Características del sitio**

Forma del terreno

El estrés parece ser una característica clave para la preferencia de los escarabajos para atacar los árboles que se encuentren en tierras altas y en tierras bajas con diferentes categorías de forma de relieve, por ejemplo, un exceso de humedad en las zonas bajas puede inducir daños y estrés en las raíces. Mientras que los árboles que crecen en las cimas de las montañas son muy propensos al estrés por sequías durante períodos secos. Los árboles que crecen en sitios con pendientes probablemente evitan cualquiera de estos dos extremos (Ray 1980).

Régimen de agua

Existen discusiones que indican que existe relación entre la forma del terreno y la aparición de las infestaciones de gorgojo en llanuras costeras, implica que la humedad del suelo puede influir directamente en la susceptibilidad del escarabajo (Ray 1980). Estudios indican que las infestaciones son comunes en sitios húmedos y en los cuales existen daños a las raíces provocados por hongos, lo que provoca una disminución del vigor de los árboles, haciéndolos susceptibles a los ataques de los escarabajos (Lorio 1968).

- **Otros factores**

Densidad y área basal

Sitios con altas densidades están más propensos a las infestaciones del gorgojo descortezador de pino. Bennet (1968), afirma que las altas densidades ocasionan que los árboles pierdan vigor y sean más susceptibles al ataque del gorgojo descortezador. Esta hipótesis fue confirmada más adelante cuando se observó que el vigor de los árboles se correlaciona con la alta densidad de árboles en el sitio, lo que hizo que estos fueran más vulnerables a los ataques del gorgojo (alta densidad, menos vigor de los árboles) (Hicks et al. 1978).

La aparición del gorgojo está fuertemente asociada con alta densidad de árboles. Ray (1980), estudió este efecto en 2021 parcelas infestadas, encontrando un área basal de 26 m²/ha en comparación con parcelas no infestadas con un área basal de 16 m²/ha.

Estudios más recientes sugieren que es necesario aplicar raleos cada 5 o 10 años a partir de los 8 años en los bosques de pino, esto con la finalidad de reducir la competencia de los árboles y mantener un crecimiento rápido. Una densidad ideal del rodal sería entre 18 y 20 metros cuadrados por hectárea (Billings y Espino 2005).

Crecimiento radial

El pobre vigor de los árboles expresado en la reducción del crecimiento radial está asociado constantemente con la infestación de gorgojo descortezador (Bennet 1968). Una investigación llevada a cabo en los períodos de 1975-1979 donde se recolectó información de más de 3000 puntos de muestreo en áreas infestadas y no infestadas en la Costa Oeste de EE. UU., consistió en la verificación y cuantificación de las relaciones entre la reducción de la tasa de crecimiento de los árboles y el ataque del gorgojo descortezador. La información recolectada fue en base a 3-5 árboles dominantes o co-dominantes en cada punto de muestreo donde colectaron los datos del espaciamento entre cada uno de los últimos cinco anillos de crecimiento anuales y de los 5 anteriores. Estos datos fueron recolectados durante 5 años, los resultados indican que el incremento en 5 años el ancho de los anillos de crecimiento en los puntos de muestreo en áreas infestadas es de 15.03 mm, mientras que en áreas no infestadas fue de 18.02 mm. De esta forma se demuestran las diferencias en el crecimiento radial de las áreas que fueron afectadas y las que no sufrieron ningún ataque (Coulson et al. 1974).

Impactos del gorgojo descortezador de pino

La muerte de los árboles es solo el primero de varios eventos derivados del impacto de este insecto. Por mencionar algunos, la muerte de los árboles provoca aberturas a nivel de dosel del bosque, afectando así la cantidad de luz solar que llega al sotobosque. Estos cambios de luz afectan a las especies que crecen después que ha existido una infestación de gorgojo (Leuschner 1980).

Históricamente, los bosques de Honduras han sido los más afectados en la región, por ejemplo, de 1962 a 1965 fueron afectadas más de 2 millones de hectáreas. En el período de 2000 a 2003 fueron afectadas 24,300 hectáreas aproximadamente. Las infestaciones afectaron en mayor parte a rodales jóvenes y densos (Billings et al. 2014).

Los ataques más recientes a los bosques hondureños en 2015 dejaron un daño de aproximadamente 953,349 hectáreas afectadas por la plaga (CONADEH 2016).

En el caso de Guatemala, en 1977 la FAO determinó que el gorgojo descortezador había afectado un área de 93,134 hectáreas de bosques de coníferas en los departamentos de Quetzaltenango, Quiché, Huehuetenango, Totonicapán, Sololá y San Marcos (Pitoni 1980).

Para el año de 1980, en el Altiplano occidental de Guatemala, fueron afectadas 100 mil hectáreas de pino colorado (*Pinus rudis*) a causa de *Dendroctonus adjunctus*. En este año el avance del gorgojo del pino fue de 8 a 12% anualmente, lo que implicaba el desarrollo de brotes en expansión (Castaneda 1980).

Para la década de los años 90, el gorgojo descortezador afecta áreas al norte del país, especialmente en el departamento de Petén, donde afecta bosques naturales y plantaciones forestales. Entre el período de 2000-2001 la plaga afectó 3,000 hectáreas de bosque natural (Castañeda 2001).

Impactos en la madera

Uno de los grandes impactos derivados del ataque del gorgojo de pino es la reducción drástica del volumen de madera que puede cosecharse. Esta reducción de volumen es debido a cualquier árbol comercializable que no haya podido ser salvado, cosecha de árboles antes de tiempo o ambas. El valor de la madera salvada también puede verse afectado por factores como la descomposición, manchas o agujeros provocados por insectos, aumento de los costos de explotación y tramitación (Leuschner 1980).

En Guatemala, por ejemplo, entre el año 2000 y 2001 fueron afectadas alrededor de 3000 hectáreas de bosques de pino, ocasionando cuantiosas pérdidas debido a que la madera de los árboles infestados no pudo ser comercializada (Castañeda 2001).

Figura 3. Daños causados por el gorgojo descortezador del pino al árbol hospedero.



Fuente: Billings 2005

Impactos hidrológicos

Generalmente, los impactos hidrológicos se miden por la cantidad de agua que proveen las cuencas hidrográficas (rendimiento), la duración y tiempo de los flujos alto y bajo (régimen) y la calidad de agua. Los ataques de gorgojo de pino pueden aumentar temporalmente el rendimiento al eliminar la vegetación y reducir la transpiración y la cantidad de precipitación interceptada por pinos sanos. El régimen está determinado por el tiempo, la intensidad de la precipitación, la permeabilidad del suelo, déficit hídrico del suelo y profundidad del suelo. Los impactos de los ataques del gorgojo en cuanto al régimen dependen de la distancia al punto de la corriente principal, cuanto más distante es el lugar del ataque, es menos probable que el flujo de la corriente se vea afectado. Respecto a la calidad, los impactos tienen varias dimensiones que van desde, erosión del suelo (sedimentación), aumento de la lixiviación de nutrientes (Leuschner 1980).

Fases de ataque del *Dendroctonus*

Para tener objetivos claros de control y monitoreo que se debe realizar, es esencial reconocer las tres fases de ataque del gorgojo de pino.

Fase 1. Pinos con ataques recientes

Esta fase involucra la participación de las hembras de *D. adjunctus*, las cuales una vez habiendo penetrado el árbol hospedero, producen las feromonas de atracción a los demás escarabajos, lo cual inicia una reacción en cadena. Las feromonas liberadas, atraen la cantidad suficiente de escarabajos para matar al árbol, sin embargo, los individuos que ya no son necesarios en el mismo árbol se dispersan a los árboles vecinos, expandiendo así la infestación. Los árboles en esta fase no presentan ningún cambio de coloración en el follaje por lo que es importante determinar la cantidad y localización en el rodal (Billings et al 1990). Algunas características para identificarlos son:

- Follaje aparentemente normal (color verde)
- Grumos de resina, suaves y blancos o ligeramente rosados.
- La corteza permanece firme y difícil de quitar del tronco.
- Algunos depredadores de *D. frontalis* pueden observarse caminando sobre los troncos de los árboles recién infestados.

Fase 2. Pinos con crías de *D. adjunctus*

En esta fase se detiene la producción de feromonas. Los huevecillos eclosionan y las larvas pequeñas de color blanco inician su alimentación en las galerías que fueron construidas en la corteza interna. Conforme avanza el desarrollo de estas larvas se van desplazando hacia la corteza externa donde cambian a pupas y luego a adultos (Billings et al 1990). Los árboles presentan algunas de estas características:

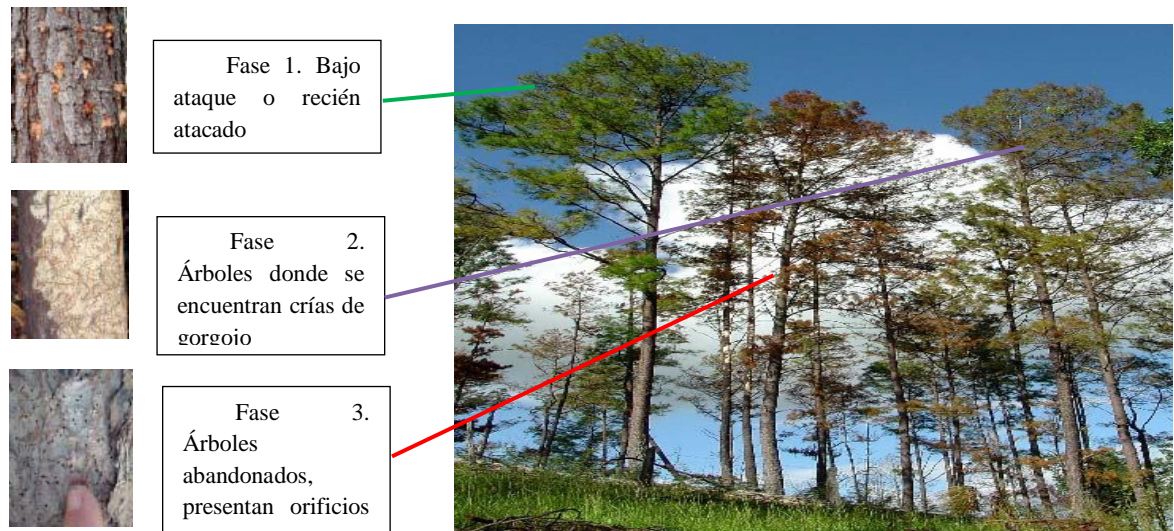
- Follaje puede ser verde en la mayoría de árboles con crías en desarrollo, pero puede tornarse amarillo o rojizo antes de que una nueva generación emerja del árbol hospedero.
- Grumos de resina blancos y duros.
- Perforaciones de salida en el tronco del árbol.
- Aserrín en pequeñas o moderadas cantidades en la base del árbol.
- Corteza suelta o fácil de separar del tronco.
- Posible encontrar larvas dentro de la corteza.

Fase 3. Pinos muertos y abandonados por el gorgojo de pino.

Después de haber madurado en la corteza, los adultos nuevos emergen y vuelan para buscar nuevos árboles hospederos. Los árboles en los cuales no se encuentra ningún estado de desarrollo del gorgojo, son llamados inactivos (Billings et al 1990). Algunas características son:

- Follaje en la mayoría de árboles es rojizo, acículas pueden empezar a caer.
- Aserrín abundante en la base del árbol.
- Grumos de resina duros y amarillentos.
- Corteza muy suelta y fácilmente separada del tronco.
- Superficie de la madera color café oscuro a negro.

Figura 4. Fases de expansión de *D. adjunctus*



Fuente: Billings y Espino 2005

Antecedentes de Dendroctonus en Guatemala

Para el año 2012, se estimó la cobertura forestal de Guatemala en 3 711 366 hectáreas, correspondientes a un 34% del territorio natural. Los bosques de coníferas tienen una superficie de 298 982 hectáreas que corresponden al 2.76% de la superficie forestal del país (INAB, CONAP 2015).

Los problemas más graves de escarabajos descortezadores se han producido en la región del Altiplano y ha sido atribuido a *D. adjunctus* en lugar de *D. frontalis*. En 2000 y 2001, los bosques de pino de una región del departamento de Petén padecieron una fuerte irrupción del gorgojo descortezador, presumiblemente de *Dendroctonus frontalis*. Perekieron casi 3000 hectáreas existentes de *Pinus caribaea* (Billings y Schmidtke 2002).

Las 2 especies más importantes de *Dendroctonus* en Guatemala son: *D. adjunctus* y *D. frontalis* (Cuadro 1).

Cuadro 1. Diferencias y similitudes de *D. adjunctus* y *D. frontalis*

Especie	Tamaño	Rangos de ataque	Especies	Otras características
<i>D. adjunctus</i>	5.4 mm	Preferiblemente ataca bosques sobre los 2800 msnm (Castañeda 2002)	<i>P. rudis</i> <i>P. maximinoii</i> <i>P. ayacahuite</i> <i>P. pseudostrubus</i>	Color del insecto negro o café oscuro.
<i>D. frontalis</i>	2.8 - 3 mm	Ataca bosques entre 0 y 1500 msnm (Castañeda 2002)	<i>P. caribaea</i> <i>P. maximinoii</i> <i>P. montezumae</i> <i>P. oocarpa</i>	Color del insecto café a negro.

Elaboración propia.

Generalidades de *Pinus rudis*

Se distribuye naturalmente desde los 25°N en México hasta los 12°N en Guatemala. Su distribución altitudinal varía de 2000 a 4000 msnm, con precipitaciones anuales mayores a 1000 mm. Crece en sitios de bajas a muy bajas temperaturas con pendientes moderadas.

Comúnmente es conocido como pino colorado en la región del Altiplano Occidental de Guatemala. Es una de las especies predominantes en el occidente. Se encuentra distribuido en 18 municipios de Quetzaltenango y en 6 municipios de Totonicapán (PREVDA 2008).

1.4 RESULTADOS

Evolución de la plaga

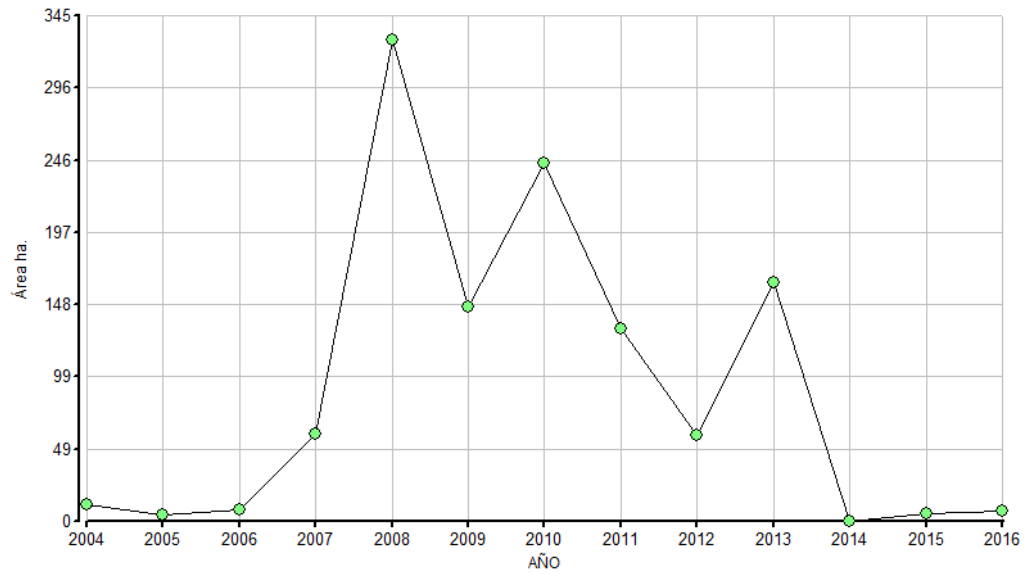
Entre el año 2004 a 2016, los bosques de coníferas de los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán fueron infestados por *Dendroctonus adjunctus*. El proceso de infestación se dio en 3 períodos:

El primer período de propagación se manifiesta entre los años 2004 a 2006, en el que se desarrollaron 8 focos de infestación, la mayoría en el departamento de Totonicapán dando como resultado un área total de 23 hectáreas de bosque de *Pinus rudis*.

El segundo período tiene lugar entre los años 2007 a 2013, en este periodo de tiempo se detectaron 771 focos de infestación, afectando un total de 1132.6 hectáreas de *Pinus rudis*.

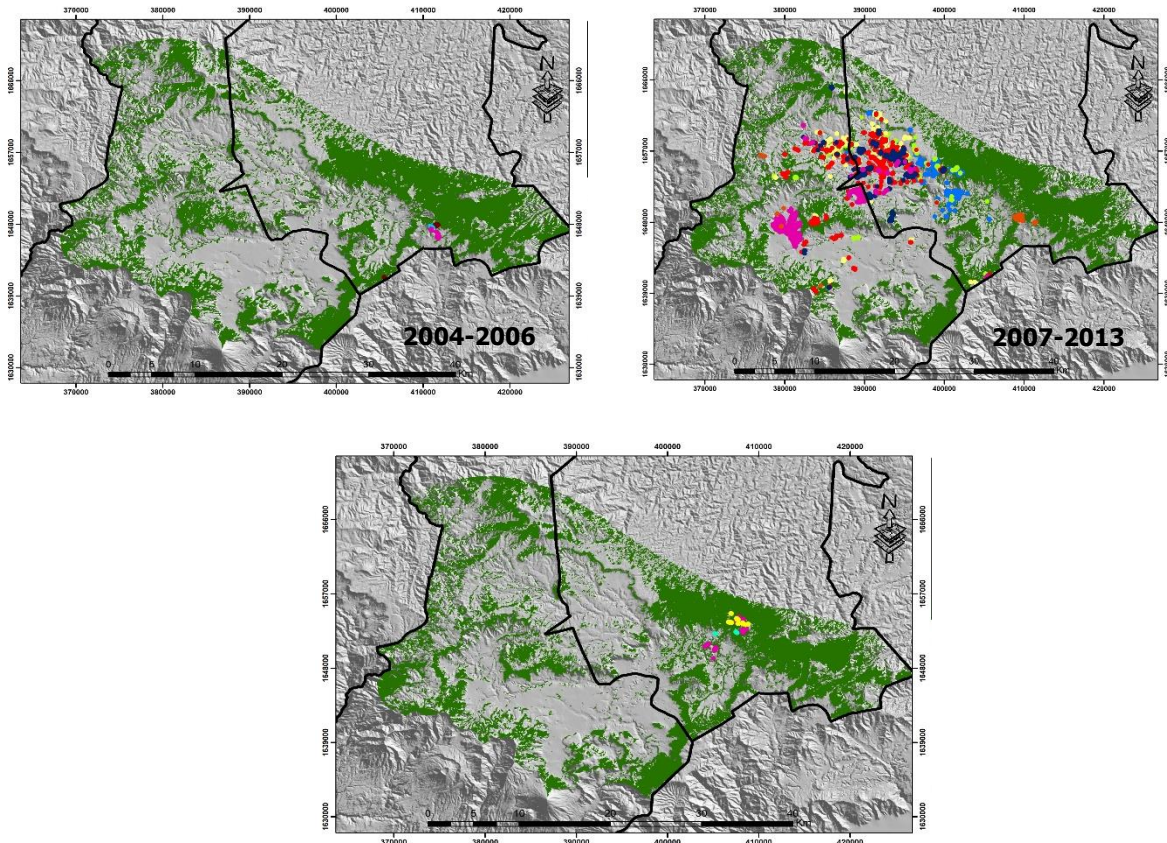
El último período corresponde a los años 2014 a 2016, se contabilizaron 31 focos de infestación, lo que representó un área total de 13 hectáreas de bosque infestadas (Figura 5).

Figura 5. Evolución de las infestaciones de *D. adjunctus* en Quetzaltenango y Totonicapán.



En total se contabilizan 1169 hectáreas afectadas. Del total de focos de infestación de *D. adjunctus*, el 68% se encuentran en el departamento de Totonicapán, mientras que el 32% restante se encuentran en el departamento de Quetzaltenango (Figura 6).

Figura 6. Áreas afectadas por *D. adjunctus* para el periodo 2004-2016.



Variables climáticas y biofísicas

Según los árboles de regresión ejecutados a través del software R 3.4.2 existen 4 variables climáticas y 3 variables biofísicas asociadas a las infestaciones de *D. adjunctus* en el área de estudio (Cuadro 2).

Cuadro 2. Variables climáticas y biofísicas relacionadas con las infestaciones de *D. adjunctus* en Quetzaltenango y Totonicapán.

Variable	Tipo
Elevación	Biofísica
El Niño Oscilación del Sur (ENSO) 2 meses antes del inicio de la infestación	Índice Climático
Temperatura registrada del mes de inicio del ataque	Climática
Precipitación 2 meses antes del inicio del ataque.	Climática
Velocidad del viento	Climática
Distancia a carreteras	Biofísica
Incendios	Biofísica

Modelo de mayor probabilidad de presencia de *D. adjunctus*

Los resultados (Cuadro 3) representan los valores de cada una de las variables usadas en el modelo, se establecen rangos de elevación, temperatura, precipitación, viento, ENSO, distancia a carreteras e incendios. La combinación de estas variables climáticas y biofísicas representan las condiciones donde existe mayor probabilidad de presencia del gorgojo descortezador en los bosques de la región.

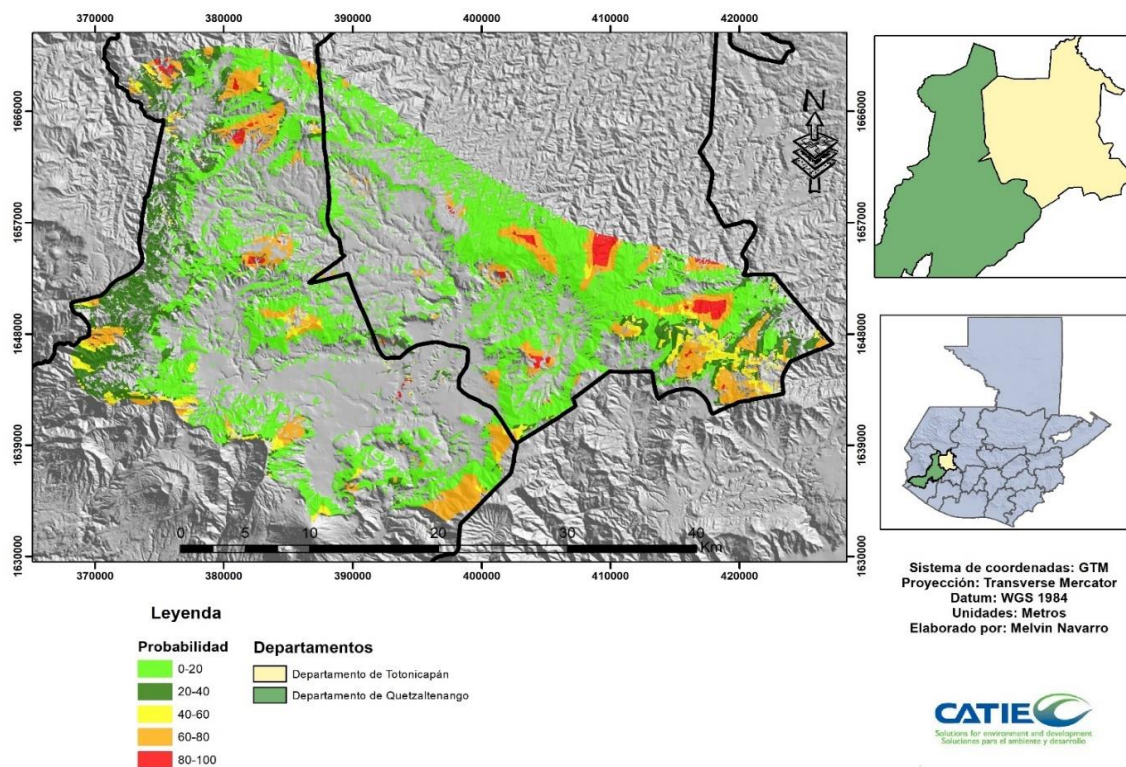
Cuadro 3. Rangos de variables climáticas y biofísicas con mayor probabilidad de presencia de *D. adjunctus*.

No.	Elevación (msnm)	Temperatura (°C)	Distancia a carreteras (mt)	Velocidad del viento (Km/h)	ENSO	Precipitación (mm)	Incendios
1	2300-3155	14-19	0-1,400	7.6-11	25.5-29.1	167-366	>1

Distribución actual del gorgojo descortezador (*Dendroctonus adjunctus*).

Los resultados de modelación reflejan la presencia actual del gorgojo descortezador en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán. Las probabilidades de presencia tienen un valor en escala de 0 a 1, donde el valor más cercano a 1 indica presencia del insecto.

Figura 7. Distribución actual de *D. adjunctus* en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán.



1.5 PRINCIPALES CONCLUSIONES

Durante el periodo comprendido entre el año 2004 a 2016 se identificaron 810 focos de infestación en los bosques de *Pinus rudis* en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán. El agente causal corresponde a *Dendroctonus adjunctus*, afectando 1,168 hectáreas en la región. El periodo de mayor intensidad de ataques se dio entre los años 2007 a 2013.

Se identificaron 7 variables climáticas y biofísicas que están más asociadas a la capacidad predictiva del modelo. La variable temperatura del mes de inicio de la infestación y precipitación 2 meses antes del inicio de la infestación, tienen mayor asociación con los brotes de la plaga en la región.

Actualmente, los bosques de coníferas del departamento de Totonicapán tienen mayor probabilidad de presencia del gorgojo descortezador.

1.6 BIBLIOGRAFÍA

Armendariz-Toledano, F; Nino, A; Sullivan; T, B; Kirkendall; R, L; Zunig, G. 2015. A new species of bark beetle, *Dendroctonus mesoamericanus* sp nov. (Curculionidae: Scolytinae), in southern Mexico and Central America. *Annals of the Entomological Society of America* 4(April): 1-12.

Bauer, ME; Cipra, JE; Anuta, PE; Etheridge, JB. 1979. Identification and area estimation of agricultural crops by computer classification of LANDSAT MSS data. *ResearchGate* 8(1): 77-92.

Bennet, WH. 1968. Timber management and southern pine beetle research. (9):12-13.

Billings, RF; Pase, H; Flores, J. 1990. Los escarabajos descortezadores del pino, con énfasis en *Dendroctonus frontalis*: Guía de campo para la inspección terrestre. Texas Forest Service Publication 146. 19 p

Billings, RF; Schmidtke, PJ. 2002. Central America Southern Pine Beetle. Fire Management Assessment. 42 p.

Billings, RF; Espino, V. 2005. El gorgojo Descortezador del Pino (*Dendroctonus frontalis*) en Centroamérica: Como reconocer, prevenir y controlar las plagas. 17 p.

Billings, R; Smith, LA; Zhu, J; Verma, S; Kouchoukos, N; Heo, J. 2010. Developing and validating a method for monitoring and tracking changes in southern pine beetle hazard at the landscape level. 2010.

Billings, RF; Clarke, SR; Mendoza, VE; Cabrera, PC; Figueroa, BM; Campos, JR; Baeza, G. 2014. Bark beetle outbreaks and fire: A devastating combination for central America's pine forests. *ResearchGate* 124(6): 10-15.

Borden, JH. 1974. Aggregation pheromones in the Scolytidae. In *Pheromones* mar. 1974.

Bunt, WD; Coster, JE; Johnson, PC. 1980. Behavior of the southern pine beetle on the bark of host trees during mass attack. *Annals of the Entomological Society of America* 73(6): 647-652.

Castañeda, C. 1980. El gorgojo de pino en Guatemala. Guatemala INAB. 30 p.

Castañeda, C. 2001. Informe final: diagnóstico y rápida evaluación de ataque del gorgojo del pino en pinares de Poptún, Petén, Guatemala. Guatemala INAB. 21 p.

_____. 2002. El gorgojo del pino *Dendroctonus* y sostenibilidad de bienes y de los pinares de Guatemala. In *Congreso Forestal Latinoamericano (2002 GT)*. Guatemala. p 221-236.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1985. Memoria. Curso de Proyecto de Leña y fuentes alternas de energía. (1, 1985, Guatemala). Guatemala. 84 p.

Christel, LM. 2011. Distribution Parameters of *Dendroctonus frontalis* in a Georgia Landscape. ene. 2011.

Clarke, S; Nowak, JT. 2009. Southern Pine Beetle. Forest Insect & Disease leaflet. 49:1-8.

CONADEH (Comisionado Nacional de los Derechos Humanos). 2016. El gorgojo descortezador del pino y otras graves amenazas ambientales a la vida digna de los hondureños y hondureñas. Honduras. Informe especial. 77 p.

Cook, S; Cherry, S; Humes, K; Guldin, J; Williams, C. 2007. Development of a satellite-based hazard rating system for *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Scolytidae) in the Ouachita Mountains of Arkansas. Journal of economic entomology 100(2): 381–388.

Cooper, ME; Stephen, FM. 1978. Parent Adult Reemergence in Southern Pine Beetle Populations. Environmental Entomology 7(4): 574-577.

Costanza, JK; Hulcr, J; Koch, FH; Earnhardt, T; McKerrow, AJ; Dunn, RR; Collazo, JA. 2012. Simulating the effects of the southern pine beetle on regional dynamics 60 years into the future. Ecological Modelling 244: 93-103.

Coulson, RN; Fargo, WS; Pulley, PE; Pope, DN; Foltz, JL; Bunting, AM. 1979. Spatial and temporal patterns of emergence for within-tree populations of *dendroctonus frontalis* (coleoptera: scolytidae). The Canadian Entomologist 111(3): 273-287.

Coulson, RN; Hain, FP; Payne, TL. 1974. Radial growth characteristics and stand density of loblolly pine in relation to the occurrence of the southern pine beetle. Environmental Entomology 3(3): 425–428.

Cuéllar Rodríguez, G; Equihua Martínez, A; Estrada Venegas, E; Méndez Montiel, T; Romero Nápoles, J. 2013. Fluctuación poblacional de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) atraídos a trampas en el noreste de México y su correlación con variables climáticas. 2013.

Evans, LM; Hofstetter, RW; Ayres, MP; Klepzig, KD. 2011. Temperature Alters the Relative Abundance and Population Growth Rates of Species Within the *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Curculionidae) Community. Environmental Entomology 40(4): 824-834.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). 2001. Proyecto Bosques y Cambio Climático en América Central. Consultado el 09 de enero de 2017. En línea www.fao.org/regional/honduras/pbcc/doc/PlanTrabajo.pdf.

Franklin, SE; Wulder, MA; Skakun, RS; Carroll, AL. 2003. Mountain pine beetle red-attack forest damage classification using stratified Landsat TM data in British Columbia, Canada. 2003.

Fronk, WD. 1947. The southern pine beetle: its life history. Virginia Agricultural Experiment. 12 p.

Gan, J. 2004. Risk and damage of southern pine beetle outbreaks under global climate change. Forest Ecology and Management 191(1-3): 61-71.

Hernández, D. 2000. Manejo Integrado del gorgojo del pino *Dendroctonus frontalis*. Honduras. 2000.

Hicks, RR; Howard, JE; Watterston, KG. 1978. The role of tree vigor in susceptibility of loblolly pine to southern pine beetle mar. 1978.

IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). 2004. Perfil Ambiental de Guatemala. Guatemala. 451 p.

_____. 2012 Perfil Ambiental de Guatemala 2010-2012: vulnerabilidad local y creciente construcción del riesgo. Guatemala. 438 p.

INAB (Instituto Nacional de Bosques); IARNA-URL. 2012. Primer Informe Nacional sobre el estado de los recursos genéticos forestales en Guatemala. Guatemala. 189 p.

INAB (Instituto Nacional de Bosques); CONAP (Consejo Nacional de Áreas Protegidas). 2015. Mapa Forestal por tipo y subtipo de bosques 2012. Guatemala. Informe técnico. 26 p.

Kalkstein, LS. 1976. Efectos of climatic stress upon outbreaks of the southern pine beetle. *Environmental Entomology*. (4):653-658.

Kinn, DN. 1978. Diel Emergence patterns of the southern pine beetle (*Dendroctonus frontalis* Zimm). *Georgia Entomological Society*. 13:80-85

Leuschner, WA. 1980. Impacts of the southern pine beetle. *The southern Pine Beetle* 137-151.

Logan, J; Bentz, B. 1999. Model Analysis of Mountain Pine Beetle (Coleoptera: Scolytidae) Seasonality. *Environmental Entomology*. 28(6): 924-925

Logan, JA; Powell, JA. 2001. Ghost forests, global warming and the mountain pine beetle (Coleoptera: Scolytidae). *Am. Entomol.* 47:160-173.

Lombardero, MJ; Ayres, MP; Ayres, BD; Reeve, JD. 2000. Cold Tolerance of Four Species of Bark Beetle (Coleoptera: Scolytidae) in North America. *Environmental Entomology* 29(3): 421-432.

Lorio, PL. 1968. Soil and Stand Conditions Related to Southern Pine Beetle Activity in Hardin County, Texas. *Journal of Economic Entomology* 61(2): 565-566.

Lorio, PL; Bennett, WH. 1974. Recurring southern pine beetle infestations near Oakdale, Louisiana. New Orleans, La., Southern Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture. 6 p.

Lorio, PL; Hodges, JD. 1968. Oleoresin Exudation Pressure and Relative Water Content of Inner Bark as Indicators of Moisture Stress in Loblolly Pines. *Forest Science* 14(4): 392-398.

Lorio, PL; Yandle, DO. 1978. Distribution of lightning-induced southern pine beetle infestations ene. 1978.

Paine, TD; Raffa, KF; Harrington, TC. 1997. Interactions among scolytid bark beetles, their associated fungi, and live host conifers. *Annual review of entomology* 42(1): 179-206.

Payne, T. 1980. The southern pine beetle: Chapter 2: Life, history and habits (en línea). Texas, USA. Disponible en <http://www.barkbeetles.org/spb/spbbook/Chapt2.html>

Pitoni, A. 1980. Planificación del control de la plaga del *Dendroctonus* y del aprovechamiento de la madera dañada. Guatemala, FAO. 113 p.

PREVDA. (Programa Regional para la Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental). 2008. Diagnóstico de la Cuenca del Río Samalá. Quetzaltenango.

Pulido-Herrera, LA; Betancourt, JA; Grant, W; Vilchez, SJ. 2015. Distribución inusual y potencial de la garrapata común del ganado, *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, en zonas tropicales de alta montaña de los Andes colombianos. *Biota Colombiana* 16(2).

Pureswaran, DS; Gries, R; Borden, JH. 2004. Antennal responses of four species of tree-killing bark beetles (Coleoptera: Scolytidae) to volatiles collected from beetles, and their host and nonhost conifers. *CHEMOECOLOGY* 14(2): 59-66.

Raffa, KF; Grégoire, J-C; Staffan Lindgren, B. 2015. Natural History and Ecology of Bark Beetles. *Bark Beetles*. s.l., Elsevier, 40 p.

Ray, R. 1980. The southern pine beetle: Chapter 4: Climatic, Site and Stand factors (en línea). Texas, USA. Disponible en <http://www.barkbeetles.org/spb/spbbook/Chapt4.html>

Sá, LB; Antonio, R; Almorox, JA. 1999. Aplicación de sensores remotos en la detección y evaluación de plagas y enfermedades en la vegetación. España. 4 p.

Sosa Chávez, JJ. 2005. Determinación de las especies del gorgojo descortezador *Dendroctonus spp (Coleoptera: Scolytidae)* y la relación con sus hospederos de pino en la finca Saquichaj, en Cobán, Alta Verapaz. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Guatemala. Universidad de San Carlos. 118 p.

Strobl, C; Malley, J; Tutz, G. 2009. An introduction to recursive partitioning: Rationale, application, and characteristics of classification and regression trees, bagging, and random forests. *Psychological Methods* 14(4): 323-348.

Thatcher, RC. 1960. Bark beetles affecting Southern pines: A review of current knowledge. in cooperation with Stephen F. Austin State College s.l., Southern Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture. 25 p.

Thatcher, RC; Pickard, LS. 1964. Seasonal Variations in Activity of the Southern Pine Beetle in East Texas. *Journal of Economic Entomology* 57(6): 840-842.

USDA (United States Department of Agriculture). 2013. Bark and Wood Boring Beetles of the World (en línea). Texas, USA. Disponible en <https://www.barkbeetles.org/browse/subject.cfm?SUB=22>

Vité, JP; Crozier, RG. 1968. Studies on the attack behavior of the southern pine beetle. *Boyce Thompson*. 24:87-93.

Vité, JP; Francke, W. 1976. The aggregation pheromones of bark beetles: Progress and problems. *Naturwissenschaften* 63(12): 550-555.

Wang, L; Gong, P; Biging, GS. 2004. Individual tree-crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70(3): 351–357.

Wood, DL. 1982. The role of pheromones, kairomones, and allomones in the host selection and colonization behavior of bark beetles. *Annual review of entomology* 27(1): 411–446.

Wood, SL. 1982. The bark and ambrosia beetles of North and Central America (Coleoptera: Scolytidae): a taxonomic monograph [North America]. *Great Basin naturalist memoirs (USA)* 1982.

Wulder, MA; White, JC; Coops, NC; Han, T; Alvarez, MF; Butson, CR; Yuan, X. 2006. A Procedure for Mapping and Monitoring Mountain Pine Beetle Red Attack Forest Damage using Landsat Imagery. *s.l., s.e., v.404*.

Wulder, M; Franklin, SE. 2003. *Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies*. *s.l., Springer Science & Business Media*, 560.

CAPÍTULO II

ARTÍCULO I. Identificación de áreas de bosque susceptibles a infestaciones de *D. adjunctus* en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala.

RESUMEN

El objetivo de este estudio está enfocado en determinar las áreas de bosques de coníferas susceptibles a infestaciones, por parte del gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus adjunctus*). Se toma como área de estudio los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, ubicados en la región del Altiplano Occidental de Guatemala.

Se establece un periodo base a partir del inicio de las infestaciones reportadas en el área de estudio. Los inicios de la plaga datan del año 2004 al presente. Sin embargo, para fines de este estudio se toma hasta el año 2016. Se elabora una base de datos a partir de cada registro obtenido dentro del periodo de años establecidos. La base de datos contiene información de variables climáticas y biofísicas para cada punto de observación según el año correspondiente.

Una vez elaborada la base de datos general, a través del programa R 3.4.2 se elaboran árboles de regresión que permitan identificar las principales variables climáticas y biofísicas asociadas al desarrollo de la plaga en la región. De cada variable se elaboran capas en formato ráster, lo que permite modelar las áreas actuales de bosque, donde existe mayor probabilidad de presencia del gorgojo descortezador del pino.

Se presenta un mapa final de las áreas de bosques de coníferas de ambos departamentos, donde se presenta la probabilidad de presencia del gorgojo descortezador en la zona de estudio. Las probabilidades se establecen en valores entre 0 y 1, donde los valores que estén más cercaos a 1, indican presencia del gorgojo descortezador.

Palabras clave: coníferas, infestaciones, gorgojo descortezador, variables climáticas y biofísicas, árboles de regresión, probabilidad.

ABSTRACT

The objective of this study is focused on determining the areas of coniferous forests susceptible to infestations, by the pine bark beetle (*Dendroctonus adjunctus*). The departments of Quetzaltenango and Totonicapán, located in the Western Altiplano region of Guatemala, are taken as the study area.

A base period is established from the beginning of the infestations reported in the study area. The beginnings of the plague date from the year 2004 to the present. However, for the purposes of this study, it is taken until 2016. A database is prepared based on each record obtained within the established period. The database contains information on climatic and biophysical variables that are related to the incidence of the pest in the area.

Once the general database has been drawn up, through the R 3.4.2 program, regression trees are developed to identify the main climatic and biophysical variables associated with the development of the pest in the region. From each variable layer are made in raster format which allows us to model the current areas of forest, where there is a greater probability of presence of the pine bark beetle

A final map of the areas of coniferous forests of both departments is presented, where the probability of presence of the bark beetle in the study area is presented. The probabilities are established in values between 0 and 1, where the values that are closest to 1 indicate the presence of the bark beetle.

Key words: conifers, infestations, bark beetle, climatic and biophysical variables, regression trees, probability.

1.1 INTRODUCCIÓN

Según estudios realizados por CATIE (1985), en América Central se ha reportado la presencia de seis especies de *Dendroctonus*: *D. frontalis*, *D. adjunctus*, *D. approximatus*, *D. valens*, *D. parallelocolis* y *D. vitei*, todas atacan los bosques de coníferas. Pueden ser halladas también en México y Estados Unidos. Recientemente, se ha descubierto una nueva especie de gorgojo llamado *Dendroctonus mesoamericanus* que ataca 8 especies diferentes de pinos originarios de Centroamérica (Armendariz-Toledano et al. 2015).

En Guatemala una de las plagas forestales más destructivas y consideradas de mayor importancia económica y ecológica, la constituye el gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus spp.*). Según registros históricos ha afectado más de 100000 hectáreas de bosques de conífera a nivel nacional. Los primeros daños registrados datan del año de 1895 hasta la actualidad, teniendo ciclos de apareamiento entre 15 y 17 años. En la región del Altiplano Occidental de Guatemala, específicamente en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, el hospedero principal del gorgojo descortezador es el pino colorado (*Pinus rudis*) siendo de las especies predominantes y nativas de la región (Castañeda 1980).

En 2000 y 2001, los bosques de pino de una región del departamento de Petén padecieron una fuerte irrupción del gorgojo descortezador, presumiblemente de *Dendroctonus frontalis*. Perecieron casi 3000 hectáreas existentes de *Pinus caribaea* (Billings y Schmidtke 2002). Según datos de expertos del INAB, el área afectada representaba un 32% de bosques puros de coníferas en Petén. En cuanto a los daños económicos, los costos de reposición de esas plantaciones fueron de aproximadamente 20 millones de quetzales, sin considerar la pérdida de material genético, los medios de vida de las personas que dependen de estos bosques y los servicios ambientales que dicho bosque prestaba a la sociedad guatemalteca (Castañeda 2001).

Dendroctonus es una de las plagas más importantes en los bosques y plantaciones de Guatemala. Durante y después de su ataque, esto debido a que reduce el valor de la madera en pie, en especial donde el monitoreo y control son difíciles de aplicar, tomando en cuenta el alto costo que representa (Sosa 2005).

Billings et al (1990), menciona que es muy importante reconocer las fases de ataque del gorgojo descortezador ya que, esto puede ser la base para definir objetivos de control y monitoreo que se debe realizar para contrarrestar los efectos producidos por la plaga.

En Guatemala se han realizado esfuerzos para monitorear los recursos forestales del país, con el apoyo de FAO (1988), INAB y MAGA (1999), Universidad del Valle de Guatemala (2000), Cooperación Técnica Alemana -GIZ- a través de su Programa Regional REDD/CCAD-GIZ- (2012) se han elaborado mapas de la cobertura forestal hasta el año 2012. No obstante, a pesar de estos esfuerzos, no se cuenta con información necesaria para llevar a cabo un monitoreo a mayor detalle que permita conocer el estado de los bosques. Por otra parte,

existe un vacío de información en la parte de modelaje para determinar áreas potenciales con riesgo a ataques del gorgojo descortezador.

Existen una serie de factores climáticos asociados al desarrollo de *Dendroctonus* algunos de estos son la temperatura, precipitación, humedad. Otros factores asociados están definidos por la densidad del rodal, incendios forestales, tipo de suelo y calidad de sitio.

El presente estudio pretende identificar las áreas de bosque de los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, que se encuentran susceptibles a las infestaciones por parte del agente *Dendroctonus adjunctus* que es la principal plaga de coníferas de esta región. Para lograr esto, se desarrolla un modelo que permita conocer las áreas más vulnerables a ser infestadas por el gorgojo en base a una serie de condiciones climáticas y biofísicas.

Con base en los resultados del modelo desarrollado, se establecen reglas de decisión que indican aquellas condiciones ideales donde exista más posibilidad de encontrar presencia de gorgojo de pino. Como resultado final se presenta un mapa de las áreas de bosque más susceptibles a ser infestadas por el gorgojo descortezador.

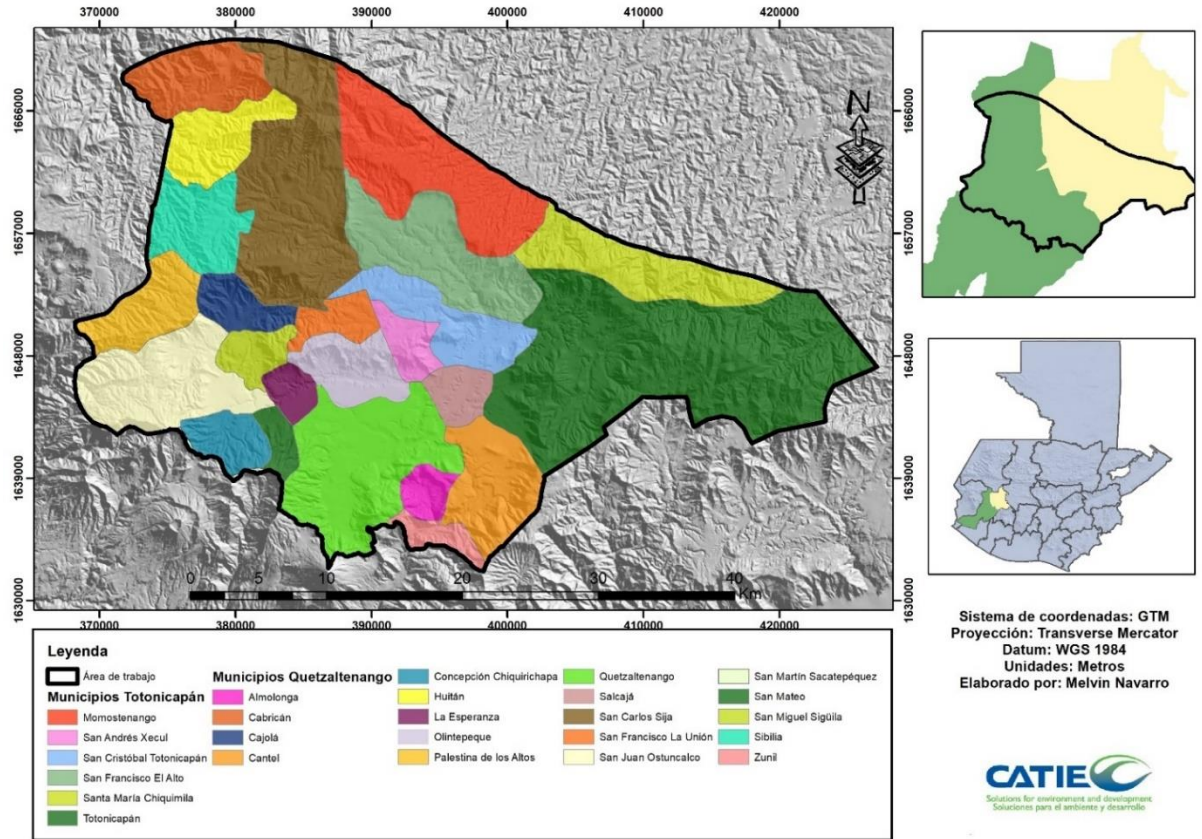
El mapa final de probabilidad de distribución de *Dendroctonus adjunctus* en los bosques de coníferas de la región, puede ser una herramienta muy importante que apoye la correcta toma de decisiones por parte de autoridades gubernamentales, ligadas a la protección de los bosques en Guatemala, en este caso el Instituto Nacional de Bosques -INAB-.

1.2 MATERIALES Y MÉTODOS

1.2.1 Área de estudio

Esta investigación se realizó en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, pertenecientes la región del Altiplano Occidental de Guatemala. El área de estudio (14°50'45" N, 91°21'38" O) comprende parte de la zona boscosa de coníferas de la región. El área total es de 1,216 km², que incluye 18 municipios del departamento de Quetzaltenango y 6 municipios del departamento de Totonicapán. La precipitación promedio para ambos departamentos oscila entre 500 a 1,160 mm al año (MAGA 2005), y la temperatura promedio para ambos departamentos oscila entre 12 °C a 15 °C (MAGA 2005). Posee un rango altitudinal que va de 1,900 a 3,400 metros sobre el nivel del mar. Los usos y coberturas predominantes son bosques de coníferas, latifoliadas y mixtos.

Figura 8. Ubicación del área de estudio, departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala.



La mayor parte del área de estudio abarca la parte alta de la Cuenca del Río Samalá que forma parte de la Vertiente del Pacífico de Guatemala.

1.2.2 Mapeo de zonas infestadas por *Dendroctonus adjunctus*.

En Guatemala se encuentran 6 especies del género *Dendroctonus* que afectan los bosques de coníferas del país. Los principales géneros de *Dendroctonus* son: *D. adjunctus*, *D. frontalis*, *D. valens*, *D. woodi*. El de mayor importancia económica corresponde a *D. adjunctus* cuyos insectos son los más destructivos en el Altiplano Occidental de Guatemala (ECOSUR 2011).

Para la identificación de las zonas infestadas dentro de la zona de estudio, se obtuvieron registros históricos que fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Bosques -INAB- subregión VI-3 ubicada en el departamento de Totonicapán. Los registros corresponden a áreas afectadas a partir del año 2004 a 2012, estos incluyen coordenadas de ubicación en DATUM GTM WGS-1984 y áreas de los mismos expresado en hectáreas.

Posterior a esto, a través del programa QGIS 2.18.4 se plotearon los polígonos afectados y fueron validados por medio de imágenes satelitales Landsat 7 y Landsat 8. Debido a la resolución espacial de dichas imágenes (30 x 30 mt), únicamente fue posible verificar polígonos con áreas superiores a 5 hectáreas (Kobler et al 2000).

Una de las características de la región es que, la mayoría de propietarios de las áreas infestadas por *D. adjunctus* son áreas bajo la modalidad de minifundio (áreas menores a 1 hectárea), por lo que esto representó una limitante para validar estas áreas con imágenes Landsat. Para contrarrestar esto, se usó la plataforma Google Earth Pro, la cual permite tener una mejor apreciación de las áreas minifundistas de la región.

Para la identificación de áreas afectadas a partir de los años 2013 a 2016, se usaron imágenes satelitales Landsat 8, Google Earth Pro y visitas de campo para validar el proceso.

Durante el periodo de tiempo comprendido entre 2004 y 2016, se lograron identificar y mapear 810 focos de infestación.

1.2.3 Datos climáticos, biofísicos y topográficos.

Para fines de esta investigación, es importante usar bases de datos climáticas con alta resolución. Para el caso de variables climáticas, se usaron las más influyentes en el desarrollo de la plaga, además de 3 variables topográficas y 2 biofísicas para conocer la influencia de cada una en el desarrollo de la plaga en la región de estudio.

Cuadro 4. Cuadro descripción de variables climáticas y biofísicas utilizadas en el estudio.

Variable	Tipo	Unidades	Escala	Fuente
Temperatura	Climática	°C	0.5 °	Datos satelitales CRU (Climate Research Unit), Universidad de Anglia del Este, Reino Unido. 2017
Precipitación	Climática	Mm	0.05 °	Datos satelitales CHIRPS (Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data). 2017
Velocidad del viento	Climática	Km/H	Regional	Estaciones meteorológicas INSIVUMEH, Guatemala.
El Niño Oscilación del Sur (ENSO)	Climática	Índice	Índice	NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)
Distancia a carreteras	Biofísica	Mt	1:50,000	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA- Guatemala.
Densidad poblacional	Biofísica	Hab/km ²	1:250,000	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA- Guatemala.
Elevación	Topográfica	Msnm	12.5 mt	Alaska Satellite Facility
Pendiente	Topográfica	Porcentaje		
Suelo	Topográfica	Categoría	1:250,000	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA- Guatemala.

Tipo de modelo seleccionado

El modelo seleccionado es de tipo probabilístico. Este tipo de modelos es aquel cuyo proceso es no determinista, en la medida que el subsiguiente estado del sistema está determinado tanto por las acciones predecibles del proceso como por elementos aleatorios. No obstante, cualquier desarrollo temporal que pueda ser analizable en términos de probabilidad se basa en un proceso estocástico.

1.2.4 Elaboración de base de datos climáticos y biofísicos para el modelo.

A partir de cada polígono afectado por *D. adjunctus* y las capas de datos climáticas y biofísicas, se elaboró una base de datos obtenida de cada una de las siguientes variables:

Cuadro 5. Estructura de base de datos creada para la modelación.

Temperatura del mes de la infestación.	Precipitación del mes de la infestación.
Temperatura 2 meses antes de la infestación.	Precipitación 2 meses antes de la infestación.
Temperatura 4 meses antes de la infestación.	Precipitación 4 meses antes de la infestación.
Temperatura promedio en época de verano.	Precipitación acumulada en época de verano.
Temperatura promedio en época de invierno.	Precipitación acumulada en época de invierno.
Índice ENSO del mes de la infestación	Velocidad del viento promedio para cada año
Índice ENSO 2 meses antes de la infestación	Distancia de cada área afectada a caminos
Índice ENSO 3 meses antes de la infestación	Densidad poblacional dentro de la zona de estudio.
Índice ENSO 4 meses antes de la infestación	Elevación
	Pendiente en porcentaje

Según literatura consultada (Billings y Espino 2005), el género *Dendroctonus* se manifiesta en 3 etapas durante la infestación a los bosques de coníferas. La fase 1 (infestación inicial) dura entre 5 y 10 días, la fase 2 dura entre 25-35 días y la fase 3 está dada por la muerte total de los árboles, presentando una coloración café o rojiza en la copa, lo cual puede tomar aproximadamente 30 días más.

Para determinar la fecha de inicio de la infestación, se observaron los polígonos en imágenes satelitales Landsat 7 y 8, así como en la plataforma de Google Earth Pro. La fase 3 es la única fase que puede identificarse a través del uso de estas herramientas, por lo que se

determinó que, la fase inicial de la infestación tuvo lugar 2 meses antes a la fecha de observación.

Para fines de este estudio, se estableció un periodo de tiempo de 2 y 4 meses antes del inicio de la infestación, para evaluar la influencia de la variable temperatura, precipitación y ENSO en el comportamiento de la plaga.

Identificación de periodos cálidos o fríos en Guatemala: Índice Oceánico del Niño (ONI)

Para la identificación de periodos cálidos (El Niño) o fríos (La Niña), se hace uso del Índice Oceánico del Niño (ONI). Este índice es utilizado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) del Departamento de Comercio de los Estados Unidos, para la identificación de eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña), en el Océano Pacífico tropical.

El ONI se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región "El Niño 3.4", la franja comprendida entre 5°N – 5°S y 120°-170°W (NOAA 2017).

Para efectos históricos, la identificación de episodios cálidos (anomalías positivas, El Niño) o fríos (anomalías negativas, La Niña), se da cuando el valor de ONI supera el umbral de +0.5 °C para el Niño o es inferior a -0.5°C para La Niña, durante al menos cinco períodos consecutivos (NOAA 2017).

1.2.5 Árboles de clasificación y regresión (*Random Forest*)

Los árboles de clasificación y regresión son un enfoque de regresión no paramétrica simple, que sondan y exploran datos con el objetivo de identificar la combinación de variables que puedan predecir con la mayor precisión posible, la presencia de especies, a través de la segmentación de una muestra en grupos homogéneos respecto a la variable de respuesta (Strobl et al. 2009).

El algoritmo usado para la estimación de los parámetros y segmentación de los árboles de clasificación y regresión es *Random Forest* (Liaw y Wiener 2002), que se basa en un método de partición desarrollado para trabajar con muestras (n) pequeñas y problemas grandes *p*. Involucran un ensamblaje *ak: set* de árboles que son calculados en subconjunto de datos aleatorios, usando un subconjunto aleatoriamente restringido y predictores, que son seleccionados para cada uno de los nodos que conforman los árboles. Debido a esto, el algoritmo *Random Forest* es capaz de examinar mejor la contribución y el comportamiento de cada predictor (Strobl et al. 2009).

Para la elaboración de los árboles de regresión se tomó como variable dependiente el área de cada uno de los 810 focos de infestación detectados en el área de estudio. Las variables climáticas y biofísicas que se usaron para explicar el desarrollo de la plaga y para crear los árboles de regresión, son las descritas anteriormente (Cuadro 5).

Para ejecutar los árboles de regresión se usó el programa R 3.4.2, con la librería *Random Forest*. Para cada variable climática se elaboró un árbol de regresión. A partir de los resultados obtenidos, se escogió la variable de mayor importancia. Por medio de los árboles de regresión, el modelo asigna un valor de importancia a cada variable en base al grado de influencia de cada una sobre la variable dependiente (área en hectárea de cada polígono).

Una vez teniendo las variables climáticas de mayor relevancia, se construye un modelo usando el algoritmo *Random Forest*. En el modelo final se incluyen las variables biofísicas y velocidad del viento.

1.2.6 Generación de ausencias

Para que el modelo tenga un correcto funcionamiento, es necesario tener puntos de ausencia del insecto en el área de estudio. Para este proceso, se generaron falsos positivos (polígonos infestados que el modelo usa como ausencias asumiendo que no tienen las condiciones ambientales apropiadas).

1.2.7 Selección de variables más importantes para el modelo final.

A partir del modelo obtenido en el paso anterior, se corrieron 1000 modelos posibles permutando las tablas de datos, generando valores de entrenamiento para posteriormente validar cada modelo (validación cruzada). La homogeneidad de los nodos en los árboles se midió por medio de la función de impureza (*IncNodePurity*), en el cuál los valores más altos corresponden a las variables más importantes.

Finalmente, se escogieron los mejores datos de validación obteniendo un modelo final con las variables de mayor importancia.

1.2.8 Reglas de decisión

Derivado de los resultados obtenidos de los árboles de clasificación, se presentan los modelos probables de distribución de *D. adjunctus* en función de las variables climáticas y biofísicas. Esto se conoce como reglas de decisión que resulta de la combinación de todas las variables climáticas y biofísicas, donde se establecen rangos de cada variable donde existe una alta probabilidad de encontrar presencia del insecto.

1.2.9 Generación de mapas finales

Una vez teniendo el modelo final con las variables más importantes, se elaboran capas en formato Ráster de cada variable utilizada para la modelación, estas capas deben estar en la misma escala, tamaño de pixel y sistema de coordenadas. Estas capas se cargan en el programa R 3.3.4, donde el programa se encarga de generar los posibles escenarios de presencia del gorgojo descortezador según la influencia de cada variable. Se obtiene una capa final donde se muestran probabilidades de presencia del gorgojo descortezador en el área de estudio.

1.3 RESULTADOS

1.3.1 Dinámica de *Dendroctonus adjunctus* en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán para el periodo 2004-2016.

Entre el año 2004 a 2016, los bosques de coníferas de los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán fueron infestados por el gorgojo descortezador, específicamente *Dendroctonus adjunctus*, cuyos insectos son de los más destructivos en el Altiplano Occidental de Guatemala (ECOSUR 2011).

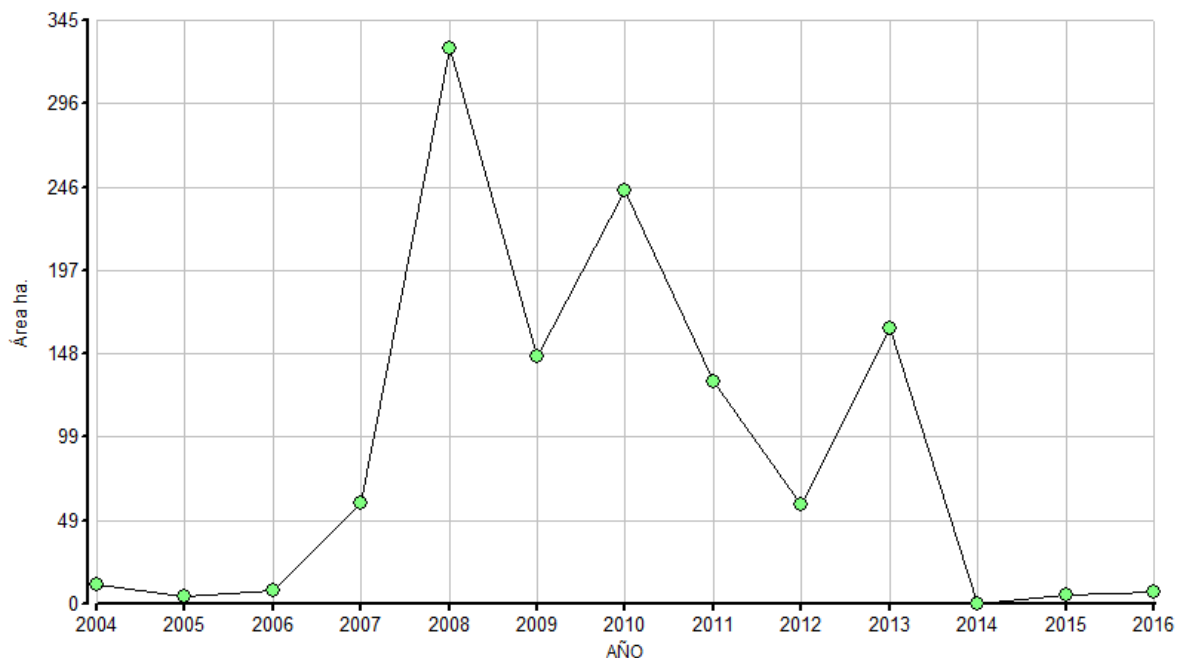
Durante el proceso de infestación se identificaron 3 etapas:

La primera etapa a partir del año 2004 a 2006, corresponde a una propagación lenta y menos destructiva. Se identificaron 8 focos de infestación, la mayoría en el departamento de Totonicapán dando como resultado un área total infestada de 23 hectáreas de bosque de *Pinus rudis*.

La segunda etapa de propagación tiene lugar entre los años 2007 a 2013, durante este periodo de tiempo se identificaron 771 focos de infestación, afectando un total de 1,132.6 hectáreas de *Pinus rudis*.

La última etapa corresponde a los años 2014 a 2016, en este periodo de tiempo se contabilizaron 31 focos de infestación, lo que representó un área total de 13 hectáreas de bosque infestadas.

Figura 9. Áreas totales de *Pinus rudis* afectadas por *D. adjunctus* en Quetzaltenango y Totonicapán para los años 2004 a 2016.



Al año 2016, se contabilizaban 1169 hectáreas de bosque de coníferas infestadas por el gorgojo descortezador. Del total de focos de área afectada por *D. adjunctus*, el 68% se encuentran en el departamento de Totonicapán, y el 32% restante se encuentran en el departamento de Quetzaltenango.

1.3.2 Principales variables climáticas asociadas al desarrollo de *D. adjunctus* en la zona de estudio.

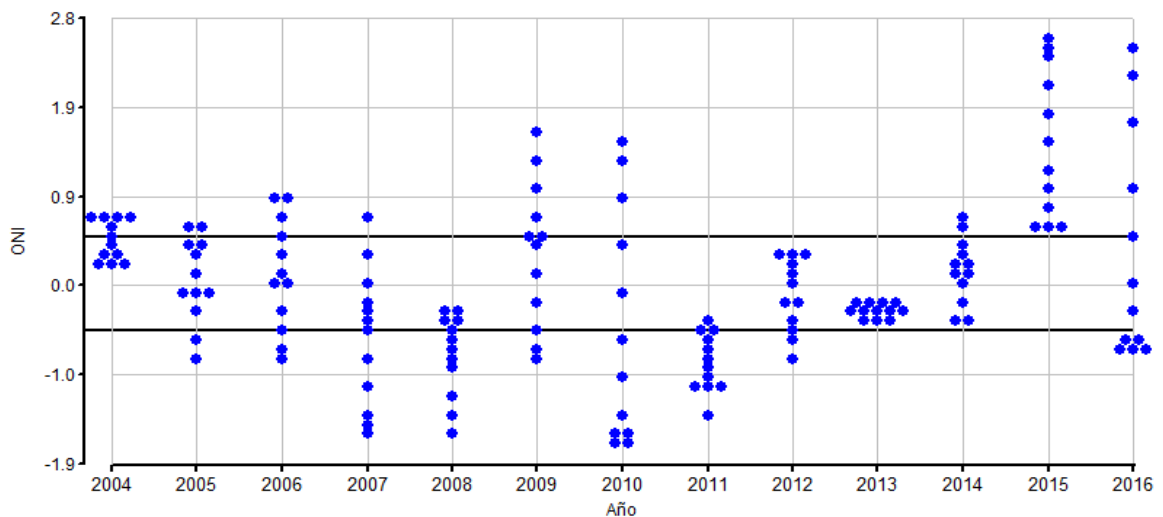
El Niño Oscilación del Sur (ENSO)

Partiendo de los valores del Índice Oceánico del Niño (ONI), durante el periodo de tiempo (2004-2016), Guatemala estuvo influenciada por el Fenómeno del Niño y La Niña (Figura 10).

La primera etapa de propagación de la plaga (2004-2006) estuvo asociada a condiciones neutrales con una leve tendencia a presencia de EL Niño, en consecuencia, una disminución de lluvias en el país especialmente para el año 2004 que registró valores de lluvia debajo del promedio. Para los años 2009, 2015 y 2016, la influencia del Fenómeno de El Niño fue más intensa durante la mayor parte del tiempo.

La etapa donde el gorgojo tuvo mayor presencia (2007-2013) estuvo marcada fuertemente por la influencia del Fenómeno de La Niña, específicamente para los años 2007, 2008 y 2010, siendo estos los años en donde la plaga afectó los bosques de coníferas con mayor intensidad. La precipitación para estos años también presenta un aumento respecto al promedio anual.

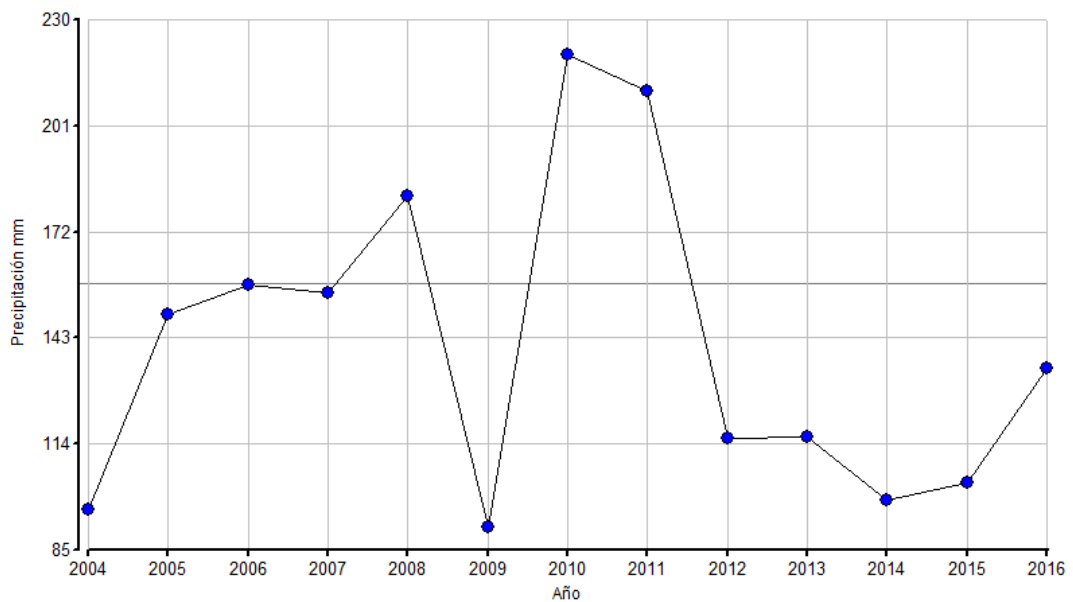
Figura 10. Valores de Índice Oceánico del Niño registrados para Guatemala.



Precipitación

En la época de invierno se registran mayores brotes de infestaciones de gorgojo de pino en el mes de septiembre, que corresponde al mes de mayor precipitación. La figura 11 muestra los valores de precipitación registrados en el área de estudio 2 meses antes respecto al mes de mayor precipitación. Los registros de mayor precipitación acumulada corresponden a los años 2008, 2010 y 2011 que se mantienen con una tendencia superior a la media (155 mm acumulados por mes).

Figura 11. Lluvia acumulada de 2 meses antes de inicio de infestación, para la zona de estudio.

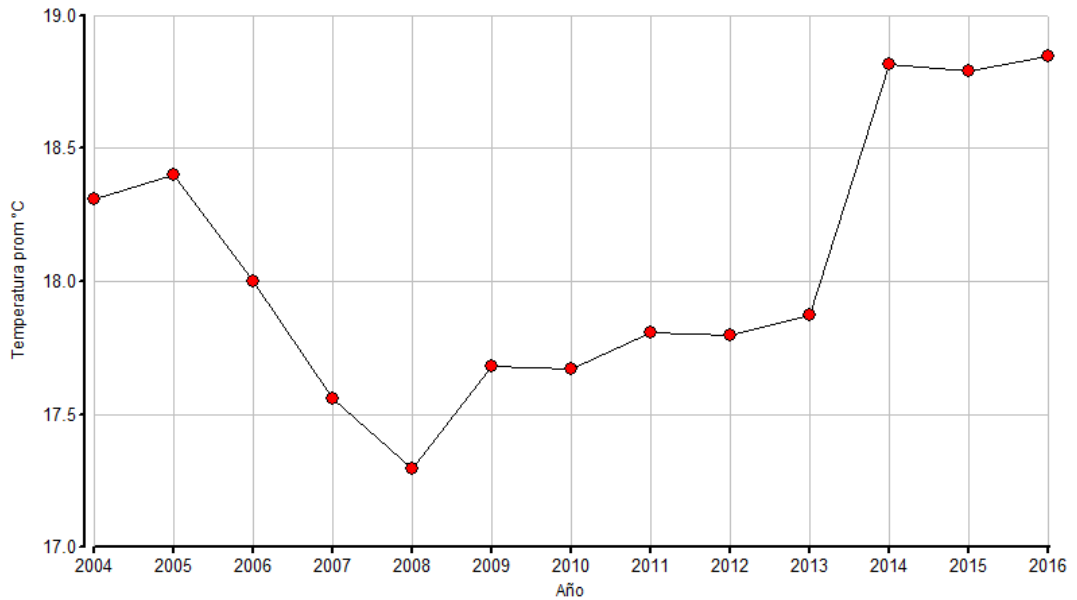


Temperatura

Debido a la variabilidad climática del país, en general eventos de canículas son más prolongados, diversas investigaciones sugieren que el gorgojo descortezador aumenta su tasa de reproducción principalmente en los meses de marzo-abril que son los meses de mayor temperatura en la zona (Méndez 2015).

Según MAGA (2005), en la zona de estudio la temperatura promedio para el mes más caluroso oscila entre 13 °C a 15 °C. La figura 12, muestra el registro de temperatura para el mes más caluroso para la zona (marzo) durante los 13 años sujeto de estudio, la temperatura media tuvo una tendencia superior al promedio establecido. La influencia del fenómeno de La Niña marcó un leve descenso de temperatura en los años 2008, 2010 y 2011 (Figura 12).

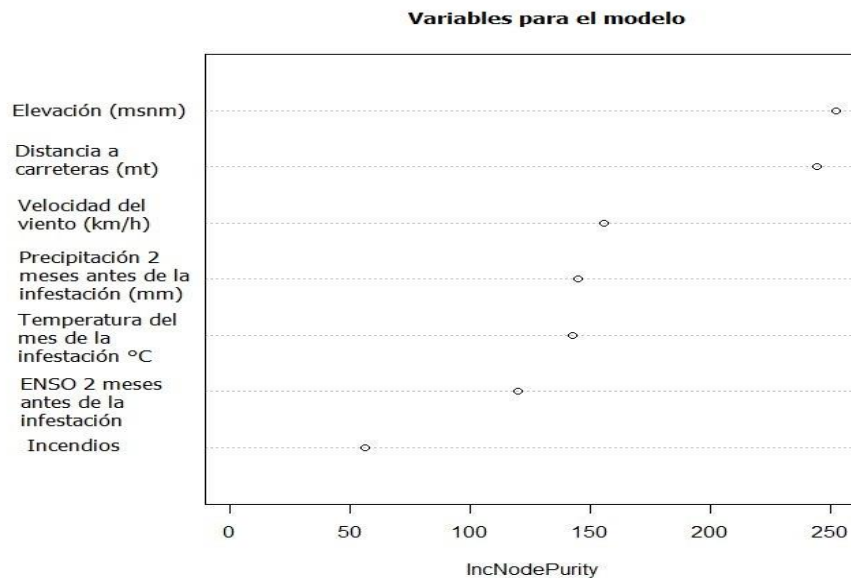
Figura 12. Temperatura media del mes de mayor infestación.



1.3.3 Variables climáticas y biofísicas más importantes usadas para el modelo de probabilidad de presencia del gorgojo descortezador.

La ejecución de árboles de regresión permitió obtener las variables más importantes asociadas a la influencia de *Dendroctonus adjunctus* dentro de la zona de estudio. Los valores más altos (IncNodePurity) indican el peso de cada una en el modelo final. Las variables más importantes son las siguientes:

Figura 13. Variables finales más importantes utilizadas en el modelo.



1.3.4 Generación de ausencias para el modelo.

De las 810 observaciones se usaron 38 observaciones como ausencias (falsos positivos). La tasa de error reportada para ausencias de 69% mientras que, para las presencias es un error estimado de 0.6%.

Cuadro 6. Matriz de confusión del modelo.

	0	1	Error
0	12	27	0.6923 0769
1	5	765	0.0064 9351

El error de estimación general del modelo es de 3.96%

1.3.5 Reglas de decisión

Los resultados en el cuadro 7 son los valores de cada variable usadas en el modelo, donde se establecen rangos de elevación, temperatura, precipitación, viento, ENSO, distancia a carreteras e incendios.

Se seleccionó el modelo que más se ajusta a los datos obtenidos en campo. La combinación de estas variables climáticas y biofísicas representan las condiciones donde existe mayor probabilidad de presencia del gorgojo descortezador en los bosques de la región.

Cuadro 7. Modelo final: mayor probabilidad de ocurrencia del gorgojo descortezador de pino.

No.	Elevación (msnm)	Temperatura (°C)	Distancia a carreteras (mt)	Velocidad del viento (Km/h)	ENSO	Precipitación (mm)	Incendios
1	2300-3155	14-19	0-1,400	7.6-11	25.5-29.1	167-366	>1

1.4 DISCUSION

1.4.1 Dinámica de *Dendroctonus adjunctus* en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán para el periodo 2004-2016.

Desde 1895 los bosques de coníferas del Altiplano Occidental de Guatemala han sufrido 6 infestaciones ocasionadas por el gorgojo descortezador *Dendroctonus adjunctus*. Los ciclos de aparición se han registrado aproximadamente cada 17 años (Castañeda 1980).

Desde hace años se ha evidenciado la pérdida gradual del potencial genético que tiene el pino colorado (*Pinus rudis*) debido a que a lo largo de las infestaciones que se han dado desde 1895, los árboles mueren a consecuencia de las infestaciones, liberando semillas que dan lugar a regeneración natural, misma que, a través del tiempo se ve amenazada nuevamente por las infestaciones del gorgojo descortezador (Méndez 2015).

Según el recorrido en campo y el aporte de algunos estudios realizados en la zona, existen diversas causas que favorecen el avance y desarrollo del gorgojo descortezador en los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán.

Causas culturales: ambos departamentos se caracterizan por la protección y conservación de los bosques, muchos desde el punto de vista religioso o creencias ancestrales, donde la intervención humana en los bosques no es aceptada por parte de los comunitarios o propietarios de tierras (Méndez 2015). Esto provoca que los bosques crezcan sin ningún tipo de manejo silvicultural, lo que a los hace más vulnerables a plagas y enfermedades.

Causas políticas: muchas municipalidades de ambos departamentos se oponen a la intervención por parte de entidades gubernamentales -en este caso INAB- en los bosques municipales, ya sea con fines de prevención o de saneamiento (Méndez 2015).

Manejo inapropiado del producto forestal infestado por la plaga: cuando se identifica y se sana un área que se encuentra en cualquiera de las 3 etapas de infestación, el producto forestal no recibe ningún tratamiento antes de ser transportado, lo que facilita la dispersión del gorgojo hacia otras áreas donde puede dar lugar a un nuevo brote.

1.4.2 Principales variables climáticas asociadas al desarrollo de *D. adjunctus* en la zona de estudio.

Los efectos de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en Guatemala, están relacionados con su manifestación tanto en etapa cálida (El Niño), como en su etapa fría (La Niña). De 1997 al año 1998, el Fenómeno de El Niño afectó severamente la región Centroamericana (IMN 2017).

En Guatemala, sumada a la influencia de El Niño durante el año de 1998 ocurrieron una serie de incendios forestales devastadores que, sumados a factores como, altas densidades,

bosques sobre maduros y el estrés a causa de la sequía prologando, aumentaron la vulnerabilidad de los bosques de coníferas en el país, específicamente en la zona de El Altiplano Occidental del país, afectando los Departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán (Méndez 2015).

Estos antecedentes marcaron el inicio de la influencia del gorgojo descortezador en los bosques de coníferas de la región. De acuerdo con Billigs *et al.* (2014) las áreas de bosques que han sido afectadas anualmente por incendios forestales son sometidas a niveles muy altos de estrés lo que provoca un debilitamiento y menor resistencia a ataques del insecto descortezador.

En el 2004 comienzan a aparecer los primeros brotes del gorgojo descortezador en el departamento de Totonicapán la intensidad de infestaciones para este año fue baja (11.63 ha), esto asociados con precipitaciones dentro del promedio normal y temperaturas por encima del promedio. La influencia de El Niño para estos años tuvo una tendencia neutral, esta tendencia se mantiene hasta el año 2006.

A partir del año 2007, el gorgojo descortezador comienza a infestar áreas de bosque con mayor intensidad, para este tiempo, la región de Centro América comienza a ser influenciada por el Fenómeno de La Niña, siendo estos los periodos de julio 2007 a mayo de 2008 y de julio 2010 a marzo de 2011 (IMN 2017). La influencia de La Niña para estos años coincide con los años donde el gorgojo descortezador aumenta la intensidad de las infestaciones.

En la mayoría de años en que se tiene presencia del fenómeno de La Niña en Guatemala, la precipitación registra acumulados dentro de los rangos normales o arriba de lo normal (INSIVUMEH 2006). Los años con un aumento de lluvia acumulada anual fueron 2008, 2010 y 2011, que se ajustan al periodo del fenómeno de La Niña para los mismos años.

Según Castañeda (2002), *D. adjunctus* ataca bosques de coníferas en rangos altitudinales superiores a los 2,800 msnm., sin embargo, diversos autores han registrado ataques del gorgojo descortezador desde los 1600 msnm (Piña y Muñíz, 1981, Salinas et al. 2004, Sánchez et al. 2007).

Los resultados del modelo muestran que, para los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, *D. adjunctus* prefiere atacar bosques que en un rango altitudinal entre 2300 a 3155 msnm.

Diversos estudios sugieren que la temperatura y la precipitación, ambos factores ambientales son afectados por la elevación (Sheppard et al., 2002) pueden influir en el vigor del árbol (Furniss y Carolin 1977, Allen y Breshears 1998, Ayres y Lombardero 2000), limitan la distribución geográfica de los insectos (Furniss y Carolin 1977, Ungerer et al., Ayres y Lombardero 2000, Lombardero et al., 2000, Bale et al., 2002, Williams y Liebhold 2002), y regulan la fenología y voltinismo del gorgojo descortezador (Furniss y Carolin 1977, Ungerer et al. 1999, Ayres y Lombardero 2000, Hansen et al., 2001, Bale et al., 2002).

Un aumento de precipitación antecedido por un periodo largo de sequía aumenta la resistencia del árbol hospedero a los ataques del gorgojo descortezador (Ray 1980, Lorio y Hodges 1968), disminuyendo en consecuencia la población del gorgojo descortezador.

La supervivencia y el crecimiento de la población del gorgojo descortezador son altamente sensibles a las condiciones térmicas y el estrés hídrico puede influir en el vigor del árbol huésped, los brotes se han correlacionado con cambios en la temperatura (Powell y Logan 2005) y precipitación (Berg et al. 2006).

Las temperaturas medias anuales registradas en el área de estudio se mantuvieron con una tendencia superior respecto a la media estimada (12°C a 15°C). Para la zona de estudio las temperaturas promedio anual se mantuvieron hasta 3°C aproximadamente superior a la media.

La temperatura puede ser considerada una de las variables climáticas más importantes relacionadas con la dinámica de la población del gorgojo descortezador. Cano et al. (2005) menciona que el crecimiento y desarrollo de insectos depende en gran parte de la temperatura. Bentz et al (2009) menciona que la temperatura influye en todas las etapas de vida del gorgojo descortezador, de cómo se desarrolla, qué tan rápido se reproduce, cuánto tiempo vive. Las temperaturas más frías mantienen a las poblaciones de escarabajos bajo control a través de mortalidad inducida por frío y ciclos reproductivos más largos. Cuando las temperaturas son cálidas, prosperan las poblaciones de escarabajos en climas más fríos.

Bentz et al. (2009) sugiere que el gorgojo descortezador se desarrolla más rápido, y pasan a las etapas de pupa y vida adulta solo cuando las temperaturas han subido por encima de 15 grados centígrados (°C). Esto reduce el riesgo de mortalidad inducida por el frío y asegura la emergencia durante los meses de verano cuando la temperatura del aire se ha calentado, y cuando algunas especies de árboles huéspedes son más vulnerables a los ataques.

D. adjunctus al igual que todos los insectos, son poiquilotérmicos debido a que todas las reacciones químicas que se realizan en su cuerpo son directamente dependientes de la temperatura ambiental inmediata (Logan y Powell 2001; Bentz et al., 2009; Dukes et al., 2009). La tasa de desarrollo de los insectos está regulada por la temperatura y es la variable más importante en la razón intrínseca de aumento de una especie colonizante.

Cuando en los bosques se presentan condiciones extremas de sequía y altas temperaturas, los árboles son afectados en su capacidad de defensa ante plagas y enfermedades, situación que se agrava con la presencia de incendios forestales que además de los daños les causa una fuerte deshidratación (Torres et al 2004).

Estudios recientes sugieren que cambios en temperatura y precipitación influirían directamente en las poblaciones del gorgojo, a través del proceso fisiológico del insecto. Indirectamente, a través de los árboles hospederos y el aumento o disminución de depredadores naturales (Gan 2004).

A los factores climáticos descritos anteriormente se suman las altas densidades que pueden encontrarse en los bosques de coníferas de ambos departamentos. Diversos estudios sugieren que *D. adjunctus* puede infestar árboles que se encuentren en cualquier clase de dominancia, sin embargo, aquellos ubicados en la categoría de suprimido, dominado o codominante, son más susceptibles que los que se encuentran en categoría dominante, así

como aquellos lesionados por rayos o incendios. Otros árboles infestados por los insectos son los que sufren infecciones por muérdago enano o por enfermedades de raíz (Cibrián et al. 1995).

En general, los rodales densos y de mayor edad, donde los árboles deben competir por los recursos, son más susceptibles a los brotes del gorgojo descortezador, mientras que las áreas de bosque que son más heterogéneas o que contiene diferentes tipos de tamaños, edades y especies de árboles son más resistentes y resilientes. Los bosques menos poblados fomentan árboles más sanos, y debido a que el aumento de la luz solar y el viento en las copas de los árboles ayudan a dispersar las feromonas que fomentan los ataques masivos de escarabajos, algunos estudios indican que la eliminación de árboles puede reducir la susceptibilidad en algunos tipos de bosques (Bentz et al., 2009).

Dentro de la zona de estudio, existe una alta demanda de madera especialmente de coníferas. Méndez (2015) señala que aquellas zonas de bosque en los que se ha detectado presencia del gorgojo descortezador en cualquiera de sus 2 primeras fases (debido a que el producto forestal aún se puede comercializar), son aprovechadas para evitar pérdidas económicas. Sin embargo, mucha de esa madera no recibe ningún tipo de tratamiento químico antes de ser transportada lo que hace que la dispersión de esta plaga es mucho más fácil. Esto evidencia que aquellas zonas de bosque que se encuentran cerca de carreteras o caminos están más susceptibles a ser infestadas por la plaga. Por último, La velocidad del viento afecta el vuelo y la dispersión del gorgojo descortezador (Glick 1939).

1.4.3 Variables climáticas y biofísicas más importantes según el modelo de probabilidad de presencia del gorgojo descortezador

Como resultado final de la modelación de las 7 variables climáticas y biofísicas, se generaron posibles escenarios donde existe probabilidad de ocurrencia de infestaciones por parte de *Dendroctonus adjunctus*.

La precipitación y temperatura van a depender completamente de los rangos altitudinales en las que se encuentren los bosques. Según el modelo, temperaturas registradas en el mes de inicio de la infestación, con valores superiores a la media (12°C-15°C), escasas precipitaciones en la zona, con influencia del fenómeno de El Niño, y velocidades del viento superiores a 7.5 km/h, indicarían presencia del gorgojo descortezador. Sumado a esto, si se tienen antecedentes de incendios forestales propiciaría un ambiente ideal para que la plaga pueda desarrollarse, debido al debilitamiento de los árboles. La velocidad del viento incide sobre el vuelo y su capacidad de dispersión.

Existen diferentes fuentes de error asociados a la capacidad de estimación del modelo, algunas de estas causas, por ejemplo, en el proceso de identificación de puntos de infestación a través del uso de imágenes satelitales Landsat o en plataforma Google Earth Pro. Otra fuente de error asociada es que, debido al tamaño del área de estudio, es poco probable que se reporte el 100% de áreas que han sido atacadas por el gorgojo

descortezador, lo que causa una subestimación de los daños reportados al Instituto Nacional de Bosques -INAB-.

1.4.4 Distribución actual potencial de *D. adjunctus* en Quetzaltenango y Totonicapán, Guatemala.

El área de estudio tiene un área de 121,566 hectáreas, según el mapa de cobertura forestal de Guatemala (MAGA 2005), de cobertura forestal se tiene un área estimada de 44,458 hectáreas, siendo estos de coníferas y mixtos, lo que corresponde a un 37% de cobertura boscosa.

En un estudio desarrollado en el año 2015, se determinó el impacto del gorgojo descortezador del pino en la deforestación y cambios de uso de la tierra en la cuenca alta del Río Samalá, donde el autor señala que la perspectiva del avance de la plaga dentro de la cuenca se proyectaba hacia los bosques de coníferas del municipio de Totonicapán (Méndez 2015).

Es importante mencionar que durante el periodo de estudio 2004-2016, se identificó un gran porcentaje de influencia de la plaga en áreas de bosques que han sufrido un agresivo proceso de fragmentación a lo largo de los años.

Según los resultados obtenidos, uno de los municipios que actualmente puede estar siendo afectado por el gorgojo descortezador, es el municipio de Totonicapán, seguido por el municipio de Santa María Chiquimula.

Para el departamento de Quetzaltenango, actualmente las áreas potenciales de distribución del gorgojo descortezador se encuentran en el municipio de San Carlos Sija, existen áreas en el municipio de Huitán donde existe una probabilidad media de afectación de la plaga.

1.4.5 Error de estimación del modelo

A través del Software R 3.4.2 se calculó el error general de estimación del modelo, el cual presenta un valor de 3.96%. Este porcentaje de error indica una alta capacidad predictiva del modelo, por lo que este puede consolidarse como una herramienta muy importante para la predicción de ocurrencia del gorgojo descortezador en los bosques de los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán.

1.5 CONCLUSIONES

Históricamente, los bosques de coníferas de la región del Altiplano Occidental de Guatemala han sido afectados principalmente por el gorgojo descortezador (*Dendroctonus adjunctus*). En los departamentos de Quetzaltenango y Totonicapán, durante el periodo comprendido entre el año 2004 a 2016 fueron afectadas 1,169 hectáreas de bosque de pino colorado (*Pinus rudis*) siendo este, el principal hospedero de la plaga.

Se evidenció que un leve aumento de la temperatura aumenta la población del gorgojo descortezador, por otro lado, la precipitación abundante disminuye la intensidad de las infestaciones debido a que aumenta la capacidad de defensa de los árboles hospederos.

A través del desarrollo de este estudio se identificaron las principales variables climáticas y biofísicas que están asociadas al desarrollo de esta plaga dentro de la región. Variables climáticas importantes por resaltar son, precipitación acumulada 2 meses antes del inicio de la infestación, temperatura del mes de inicio de la infestación, estas variables tienen influencia tanto en el insecto como en la respuesta que el hospedero pueda tener frente a los ataques de la plaga. La velocidad del viento está asociada principalmente a la dispersión de la plaga, según resultados de los modelos de presencia de la plaga, una mayor velocidad del viento contribuye a la fácil dispersión del insecto.

Como resultado de la modelación llevada a cabo, se presentan una serie de posibles escenarios en los que existe una combinación de variables climáticas y biofísicas que pueden contribuir a la presencia del insecto en los bosques de coníferas de la región.

El mapa de probabilidad actual de presencia del gorgojo descortezador muestra que los bosques del departamento de Totonicapán están más susceptibles a ser infestados por la plaga. Para el departamento de Quetzaltenango las probabilidades actuales son menores, a excepción del municipio de San Carlos Sija.

1.6 RECOMENDACIONES

Es importante que las instituciones de gobierno encargadas del sector forestal en Guatemala enfoquen sus esfuerzos en temas de sensibilización constante a la población sobre la importancia de la silvicultura preventiva para crear esa cultura de manejo adecuado de los bosques y así minimizar la pérdida de cobertura forestal a causa de incendios forestales, plagas y enfermedades forestales.

Se debe evitar el establecimiento de rodales puros de *Pinus rudis*, ya que, según registros históricos, la plaga tiene apariciones aproximadamente cada 15-17 años, lo que afectaría seriamente a los bosques de coníferas de la región. Se recomienda establecer otras especies de pino que se adapten a la región y que no sean hospederos de *D. adjunctus* o en su defecto, el establecimiento de rodales mixtos.

Se recomienda la sensibilización de la población enfocada en el adecuado manejo del producto forestal que proviene de bosques infestados por el gorgojo descortezador, ya que el producto se transporta sin ningún tipo de tratamiento químico lo que facilita el desplazamiento del insecto de un lugar a otro.

Es importante tomar en cuenta los parámetros establecidos en los resultados del modelo, que combinan las variables climáticas y biofísicas más importantes dentro de los cuáles es posible hallar presencia del gorgojo descortezador. Esta puede ser una herramienta importante para el monitoreo del estado de los bosques de coníferas de la región.

Para el desarrollo de futuros estudios enfocados en *D. adjunctus* es importante incluir variables como la densidad de los bosques y la relación de la incidencia de la plaga con áreas de bosque fragmentadas.

Es recomendable validar los resultados de la probabilidad actual de presencia del gorgojo descortezador, según el mapa obtenido. Este proceso puede ser a través de visitas a campo para tener una mejor certeza de la capacidad predictiva del modelo.

1.7 BIBLIOGRAFÍA

Allen, CD; Breshears, DD. 1998. Drought-induced shift of a forest-woodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. *USA*. 95: 14839-14842.

Armendariz-Toledano, F; Nino, A; Sullivan, T, B; Kirkendall; R, L; Zunig, G. 2015. A new species of bark beetle, *Dendroctonus mesoamericanus* sp nov. (Curculionidae: Scolytinae), in southern Mexico and Central America. *Annals of the Entomological Society of America* 4(April): 1-12.

Ayres, M; Lombardero, MJ. 2000. Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Sci. Total Environ.* 262: 263-286.

Bale, JS; Masters, GJ; Hodkinson, I; Awmack, C; Bezemer, T; Brown, V; Butterfield, J; Buse, A; Coulson, J; Farrar, J; Good, J; Harrington, R; Hartley, S; Jones, T; Lindroth, R; Press, M; Symrnioudis, I; Watt, A, Whittaker, J. 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob. Change Biol.* 8: 1-16

Bentz, B; Logan, J; MacMahon, J; Allen, C; Ayres, M; Berg, E; Carroll, A; Hansen, M; Hicke, J; Joyce, L; Macfarlane, W; Munson, S; Negron, J; Paine, T; Powell, J; Raffa, K; Regniere, J; Reid, M; Romme, B; Seybold, S; Six, D; Tomback, D; Vandygriff, J; Veblen, T; White, M; Witcosky, J; Wood, D. 2009. *Bark Beetle Outbreaks in Western North America: Causes and Consequences*. Salt Lake City, UT: University of Utah Press. 42 p.

Berg, E; Henry, D; Fastie, C; De Volderd, A; Matsuokae, S. Spruce beetle outbreaks on the Kenai Peninsula, Alaska, and Kluane National Park and Reserve, Yukon Territory: Relationship to summer temperatures and regional differences in disturbance regimes. *Forest Ecology and Management* 227: 219–232.

Billings, RF; Pase, H; Flores, J. 1990. Los escarabajos descortezadores del pino, con énfasis en *Dendroctonus frontalis*: Guía de campo para la inspección terrestre. Texas Forest Service Publication 146. 19 p

Billings, RF; Schmidtke, PJ. 2002. Central America Southern Pine Beetle. *Fire Management Assessment*. 42 p.

Billings, RF; Espino, V. 2005. El gorgojo Descortezador del Pino (*Dendroctonus frontalis*) en Centroamérica: ¿Cómo reconocer, prevenir y controlar las plagas? 17 p.

Billings, RF; Clarke, SR; Mendoza, VE; Cabrera, PC; Figueroa, BM; Campos, JR; Baeza, G. 2014. Bark beetle outbreaks and fire: A devastating combination for central America's pine forests. *ResearchGate* 124(6): 10-15.

Cano, A; Martínez O; Torres, L; Sánchez, JA. 2005. Determinación de zonas con riesgo al ataque del descortezador *Dendroctonus adjunctus* Blandford en bosques de coníferas del sureste de Coahuila. INIFAP-CIRNE. Folleto Técnico Núm. 20. Coahuila, México. 24 p.

Castañeda, C. 1980. El gorgojo de pino en Guatemala. Guatemala INAB. 30 p.

Castañeda, C. 2001. Informe final: diagnóstico y rápida evaluación de ataque del gorgojo del pino en pinares de Poptún, Petén, Guatemala. Guatemala INAB. 21 p.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1985. Memoria. Curso de Proyecto de Leña y fuentes alternas de energía. (1, 1985, Guatemala). Guatemala. 84 p.

Cibrián, D; Méndez, M; Campos, B; Yates, H; Flores, L. 1995. Insectos Forestales de México/ Forest I nsects of Mexico. Publicación No. 6. Primera Edición. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco, estado de México. 266-363 pp.

Dukes, J; Pontius, D; Orwig, J; Garnas, V; Rodgers, N; Braze, B; Cooke, K; Theoharides, E; Stange, R; Harrington, J; Ehrenfeld, J; Gurevitch, M; Lerda, K; Stinson, R; Ayres, M. 2009. Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: what can we predict? Canadian Journal of Forest Research 39: 231-248.

ECOSUR (El Colegio de la Frontera Sur). 2011. Identificación de especies de descortezadores del género *Dendroctonus* de Guatemala. Chiapas.

Furniss, R; Carolin, V. 1977. Western forest insects. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Washington, DC.

Gan, J. 2004. Risk and damage of southern pine beetle outbreaks under global climate change. Forest Ecology and Management 191(1-3): 61-71.

Glick, PA. 1939. The distribution of insects, spiders, and mites in the air. US Department of Agriculture. Technical Bulletin Num. 673. Washington, DC USA. 151 p.

Hansen, E; Bentz, B; Turner, D. 2001. Temperature-based model for predicting univoltine brood proportions in spruce beetle (Coleoptera: Scolytidae). Can. Entomol. 133: 827- 841.

IMN (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica). 2017. El Niño: fase cálida del ENOS. Costa Rica. 5 p. Consultado 01 nov. 2017. Disponible en: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/37774/5-EL+NI%C3%91O_FASE_CALIDA_ENSO.pdf/218b0b44-31f1-48fe-92fa-4853c6beab46.

_____. 2017. La Niña: fase fría del ENOS. Costa Rica. 4 p. Consultado 01 nov. 2017. Disponible en: https://www.imn.ac.cr/documents/10179/37774/6LA_NI%C3%91A_FASE_FRIA_ENSO.pdf/19dc0864-00aa-4d06-beed-305b725ba8b6.

Kobler, A; M. Hočevár y S. Džeroski. 2000. Forest border identification by rule-based classification of Landsat TM and GIS data. In: ICML-2000 Workshop on machine learning of spatial knowledg. Stanford University. 69 p.

Liaw, A; Wiener, M. 2002. Classification and regression by random Forest. R News 2 (3): 22 p.

Logan, JA; Powell, JA. 2001. Ghost forests, global warming and the mountain pine beetle (Coleoptera: Scolytidae). *Am. Entomol.* 47:160-173.

Lombardero, MJ; Ayres, MP; Ayres, BD; Reeve, JD. 2000. Cold Tolerance of Four Species of Bark Beetle (Coleoptera: Scolytidae) in North America. *Environmental Entomology* 29(3): 421-432.

Lorio, PL; Hodges, JD. 1968. Oleoresin Exudation Pressure and Relative Water Content of Inner Bark as Indicators of Moisture Stress in Loblolly Pines. *Forest Science* 14(4): 392-398.

MAGA-UPGGR, (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación; Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo, GT). 2005. Atlas temático de la República de Guatemala, mapas a escala 1:50,000. Guatemala, Esc. 1:50,000. 62 p.

Méndez, M. 2015. Impacto del gorgojo del pino en la deforestación y cambios del uso de la tierra en la cuenca alta del Río Samalá, período 2003-2013. Tesis M.Sc. Quetzaltenango, Guatemala. USAC. 84 p.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2017. Cold and warm episodes by season.

Piña, L; Muñiz, R. 1981. Los escolítidos como plagas forestales. Monografía III. México. 117 p.

Powell, JA; Logan, JA. 2005. Insect seasonality: Circle map analysis of temperature-driven life cycles. *Theoretical Population Biology* 67: 161–179.

Ray, R. 1980. The southern pine beetle: Chapter 4: Climatic, Site and Stand factors (en línea). Texas, USA. Disponible en <http://www.barkbeetles.org/spb/spbbook/Chapt4.html>

Salinas, M; Mendoza, G; Barrios, M; Cisneros, R; Macías, S; Zúñiga, G. 2004. Areography of the genus *Dendroctonus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in Mexico. *Journal of Biogeography* (J. Biogeogr.) 31: 1163–1177.

Sánchez, G; Torres, L; Vázquez, I; González, E; Narváez, R. 2007. Monitoreo y manejo de insectos descortezadores de coníferas. Aguascalientes, México. 105 p.

Strobl, C; Malley, J; Tutz, G. 2009. An introduction to recursive partitioning: Rationale, application, and characteristics of classification and regression trees, bagging, and random forests. *Psychological Methods* 14(4): 323-348.

Torres, E; Sánchez JA; Cano A. 2004. Uso de feromonas en el manejo integrado del descortezador de pinos *Dendroctonus adjunctus* Blandford. Folleto Técnico Núm. 13. Coahuila México.

Ungerer, M; Ayres, M; Lombardero, M. 1999. Climate and the northern distribution limits of *Dendroctonus frontalis* Zimmermann (Coleoptera: Scolytidae). *J. Biogeogr.* 26: 1133-1145.

Williams, D; Liebhold, A. 2002. Climate change and the outbreak of two North American bark beetles. *Agric. Forest Entomol.* 4: 87-99.

