

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**ZONIFICACIÓN DE PLANTACIONES DE *Gmelina*
arborea AFECTADAS POR *Nectria* sp. EN RELACIÓN CON
CONDICIONES DE SUELO, CLIMA Y MANEJO EN LA ZONA
HUETAR CARIBE**

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA

JORYANA CALVO SERRANO

Cartago, Costa Rica, 2018



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**ZONIFICACIÓN DE PLANTACIONES DE *Gmelina arborea*
AFECTADAS POR *Nectria* sp. EN RELACIÓN CON
CONDICIONES DE SUELO, CLIMA Y MANEJO EN LA ZONA
HUETAR CARIBE**

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA

JORYANA CALVO SERRANO

Cartago, Costa Rica, 2018



Esta obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Zonificación de plantaciones de *Gmelina arborea* afectadas por *Nectria* sp. en relación con condiciones de suelo, clima y manejo en la Zona Huetar Caribe

Joryana Calvo Serrano *

Resumen

Gmelina arborea es una de las especies más plantadas en Costa Rica debido a su rápido crecimiento, alta calidad de madera y buena trabajabilidad, lo que la convierte en una opción popular para el establecimiento de proyectos de pagos por servicios ambientales en la categoría de reforestación con especies de rápido crecimiento. Sin embargo, en los últimos años se han estado presentando altas mortalidades de grupos de árboles desde los dos años, lo cual se asocia a la aparición de la *Nectria* sp., altas densidades de árboles y suelos no ideales para melina. En este estudio se extrajo la información de manejo disponible en los expedientes de proyectos sometidos a pagos por servicios ambientales de reforestación con melina para el periodo 2010-2017 de FONAFIFO. Se recopiló la información de clima y suelo de los proyectos para analizar el efecto que tienen estas variables sobre la *Nectria* sp. Además, se realizaron visitas de campo a una muestra de proyectos para evaluar la afectación de la *Nectria* sp. Se hicieron tablas de contingencia, árboles de decisión y una regresión múltiple para determinar la correlación entre las variables. Los métodos demostraron que existe asociación entre la presencia y el porcentaje de incidencia de la *Nectria*, con la calidad del manejo dado a las plantaciones, así como con variables de clima y suelo. Las variables predictoras más influyentes fueron la concentración de calcio, y magnesio en el suelo, así como la radiación solar y humedad relativa. Finalmente, se preparó un mapa de vulnerabilidad, donde se muestran las zonas que por sus características ambientales tienen una mayor tendencia a presentar altos porcentajes de incidencia de *Nectria* sp.

Palabras clave: Melina, porcentaje de incidencia, correlación de variables, vulnerabilidad, proyectos de reforestación con PSA, FONAFIFO.

Zoning of plantations of *Gmelina arborea* affected by *Nectria* sp. in relation to soil, climate and management conditions in the Huetar Caribe Zone

Abstract

Gmelina arborea is one of the most planted species in Costa Rica due to its rapid growth, high quality of wood and good workability, which makes it a popular choice for the establishment of reforestation projects for payments for environmental services in the fast growing species category. However, in recent years there have been high mortalities of groups of trees since two years old, which is associated with the appearance of *Nectria* sp., high densities of trees and not ideal soils for melina. In this study, the establishment and management data in the files of the reforestation projects subject to payments for environmental services in FONAFIFO for the 2010-2017 period was recorded. In addition, climate and soil information of the projects were collected to analyze the effect of these variables on the incidence of *Nectria* sp. in melina plantations. Field visits were made to a sample of projects to evaluate the fungus affectation. The data collected were analyzed using contingency tables, and decision trees including random forest and multiple regression to determine the correlation between the variables. The tests did show association between the presence and incidence of the *Nectria* with the degree of plantation management activities, and with climatic and soil variables. The most influential predictor's variables are calcium and magnesium soil concentration, as well as solar radiation intensity. Finally, a vulnerability map was prepared that shows the zones where the melina plantations may have a greater tendency to suffer high percentages of incidence of the *Nectria*.

Keywords: Melina, *Nectria*, percentage of incidence, correlation of variables, vulnerability, reforestation projects, FONAFIFO.

* Calvo, J. (2018). Zonificación de plantaciones de *Gmelina arborea* afectadas por *Nectria* sp. en relación con condiciones de suelo, clima y manejo en la Zona Huetar Caribe. (tesis de licenciatura). Tecnológico de Costa Rica, Cartago. 77p.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por Ph.D. Edgar Ortiz Malavassi, M.Sc. Marcela Arguedas Gamboa, Lic. Gilmar Navarrete como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Director de Tesis
Ph.D. Edgar Ortiz Malavassi



Lectora
M.Sc. Marcela Arguedas Gamboa



Lector
Ing. Gilmar Navarrete Chacón



Coordinador de Tesis
M.Sc. Dorian Carvajal Vanegas



Estudiante
Joryana Calvo Serrano

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a las personas que siempre me han apoyado desde que tengo memoria, para mi mamá y abuela.

Agradecimientos

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Forestal que compartieron sus conocimientos para nuestra formación como estudiantes.

Al profesor y tutor de tesis Ph. D Edgar Ortiz Malavassi, por su gran colaboración y guía durante todo este proceso.

Al profesor MS.c Dorian Carvajal por sus grandes aportes para este trabajo.

A Alex Calvo, Gilmar Navarrete y a todo el personal de FONAFIFO por toda su colaboración durante este trabajo

Índice General

Resumen.....	ii
Abstract.....	ii
Constancia	iii
Agradecimientos	iv
Índice de Cuadros	vii
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Anexos.....	ix
Introducción	1
Objetivos.....	3
Hipótesis	3
Revisión literaria	4
1. <i>Gmelina arborea</i>	4
1.1 Plantaciones de melina en Costa Rica.....	4
1.2 Pagos por servicios ambientales (PSA) de reforestación	5
1.3 PSA de reforestación y SAF en Zona Huetar Caribe	7
2. <i>Nectria</i> sp. (<i>Nectria</i>)	8
2.1.1 Relación de las variables clima, suelo y manejo en la afectación de la <i>Nectria</i> sp. en las plantaciones.....	10
Metodología	12
1. Descripción del Área de estudio.....	12
2. Recolección de Datos	13
2.1. Datos extraídos de los expedientes de los proyectos de PSA de FONAFIFO	13

2.2. Datos climáticos	14
2.3. Variables edáficas	15
2.4. Comprobación de la presencia de la Nectria en campo	17
2.4.1 Diseño de Muestreo	19
3. Determinación del Porcentaje de Incidencia	20
4. Análisis de la correlación de las variables de suelo, clima y manejo con la presencia e incidencia de la Nectria.	20
5. Elaboración de Mapa de Vulnerabilidad.....	21
Resultados y Discusión	22
1. Información de expedientes	22
2. Comprobación de la Nectria en campo.	25
3. Correlación de variables de manejo, suelo y clima con la presencia de la Nectria:	29
Análisis de Datos en R	35
4. Correlación de variables de manejo, suelo y clima con el porcentaje de incidencia de la Nectria:.....	38
Análisis de Datos en R	43
Conclusiones	49
Recomendaciones	50
Referencias	52
Anexos	58

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Clasificación de manejo silvicultural de los proyectos (2010-2017) de reforestación con melina para la Zona Huetar Caribe.....	13
Cuadro 2. Niveles críticos y condiciones medias y altas para interpretar los análisis de fertilidad de los suelos. (Valores resaltados en rojo representan niveles que pueden ser problemáticos según cada variable).....	16
Cuadro 3. Información contenida en los expedientes de los proyectos de reforestación visitados para la comprobación de la presencia de la Nectria en campo.....	18
Cuadro 4. Información recolectada de en la base de datos de los expedientes de los contratos de PSA 2010-2017.	22
Cuadro 5. Información sobre el ataque e incidencia de la Nectria de los expedientes de PSA de FONAFIFO y lo observado durante la comprobación de campo.....	26
Cuadro 6. Resultados de la prueba de Chi cuadrado y Fisher para las variables que demostraron ser significativas para la determinación de la presencia de Nectria.	29
Cuadro 7. Matriz de confusión para la predicción del Ataque de Nectria del algoritmo de Random Forest en R.	36
Cuadro 8. Variables predictoras elegidas como relevantes para cada método de correlación utilizado.	37
Cuadro 9. Resultados de la prueba de Chi cuadrado y Fisher para las variables que demostraron ser significativas para la determinación del porcentaje de la Nectria. ...	38
Cuadro 10. Coeficientes de la regresión con el método step backwards en R.	45
Cuadro 11. Variables predictoras elegidas como relevantes para cada método de correlación utilizado.	47

Índice de Figuras

Figura 1. Zona de Estudio.....	12
Figura 2. Ubicación de las estaciones climáticas de SWAT utilizadas para la descripción de las variables. Costa Rica.....	15
Figura 3. Distribución geográfica de las fincas visitadas en la Zona Huetar Caribe...	19
Figura 4. Relación entre la categoría de Mg y la cantidad de proyectos de PSA de reforestación afectados con Nectria.....	30
Figura 5. Relación entre la categoría de Ca (cmol/L) y la cantidad de proyectos de PSA de reforestación afectados con Nectria.....	31
Figura 6. Relación entre el rango promedio anual de humedad relativa y cantidad de proyectos de PSA de reforestación afectados con Nectria.	32
Figura 7. Relación entre la calidad de manejo y cantidad de proyectos de PSA de reforestación afectados con Nectria.....	33
Figura 8. Árbol de predicción para el ataque de la Nectria utilizando Tree de R.....	35
Figura 9. Relación ente la categoría de Mg (cmol/L) y porcentaje de incidencia presente en los proyectos.....	39
Figura 10. Relación entre la categoría de Ca (cmol/L) y porcentaje de incidencia presente en los proyectos.....	40
Figura 11. Relación entre la categoría de P(mg/L) y porcentaje de incidencia presente en los proyectos.....	41
Figura 12. Relación entre la calidad de manejo y porcentaje de incidencia presente en los proyectos.....	42
Figura 13. Árbol de predicción del porcentaje de incidencia de la Nectria del algoritmo Tree.....	43
Figura 14. Vulnerabilidad ante el porcentaje de incidencia de la Nectria para la zona de estudio.....	48

Índice de Anexos

Anexo 1. Diseño de muestreo del proyecto de PSA CN-01-20-309-2014 para la evaluación de la Nectria en campo.	58
Anexo 2. Diseño de muestreo del proyecto de PSA PO-01-20-0135-2012 para la evaluación de la Nectria en campo.	59
Anexo 3. Diseño de muestreo del proyecto de PSA LM-01-20-0191-2011 para la evaluación de la Nectria en campo.	60
Anexo 4. Diseño de muestreo del proyecto de PSA SA-01-20-0133-2012 para la evaluación de la Nectria en campo.	61
Anexo 5. Diseño de muestreo del proyecto de PSA LM-01-20-0144-2012 para la evaluación de la Nectria en campo.	62
Anexo 6. Diseño de muestreo del proyecto de PSA CN-01-20-0186-2012 para la evaluación de la Nectria en campo.	63
Anexo 7. Diseño de muestreo del proyecto de PSA LM-01-20-0031-2013 para la evaluación de la Nectria en campo.	64
Anexo 8. Código de R para la realización de los árboles de clasificación y predicción	65
Anexo 9. Código de R para la realización de la regresión múltiple.	66

Introducción

Los incentivos creados para promover la reforestación han sido una herramienta crucial para la recuperación de la deforestación vivida por el país durante décadas (Barrantes, 2000). El Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) referido en la Ley Forestal (1996) ha tenido como responsabilidad, promover los proyectos de reforestación, así como manejo y protección de bosque por medio de pagos por servicios ambientales (Rodríguez, 2002). Los esfuerzos del país han logrado recuperar la cobertura boscosa alcanzando un 53 %, según lo muestra el Mapa de tipos de bosques para Costa Rica (SIREFOR, 2013).

En los últimos años se ha promocionado el establecimiento de plantaciones forestales para el abastecimiento de madera que requiere el país y, entre las especies más utilizadas se encuentra la melina (*Gmelina arborea*), la cual se emplea para la fabricación de tarimas, tableros y casas (Martínez, 2015). Actualmente existen alrededor de 18 235,1 ha plantadas con esta especie (INEC, 2014). Esta especie es buscada por los productores debido a su calidad y sus cortos ciclos de corta (Alfaro & de Camino, 2002). No obstante, un problema con las plantaciones o monocultivos es la aparición de plagas y enfermedades (Méndez, 2011). En los últimos años, la *Nectria* sp. (*Nectria*), se ha convertido en un gran problema para los reforestadores, ya que este hongo junto con altas densidades de siembra y suelos incompatibles con la melina se relaciona con casos de alta mortalidad de dicha especie (Arguedas, 2004).

Se estima que de los 284 contratos de pagos por servicios ambientales (PSA) en modalidad de reforestación con melina para el periodo 2010-2017, hay 180 afectados con *Nectria* sp. lo que, consecuentemente, reduce la productividad y provoca ciclos cortos de las plantaciones, irrumpiendo el contrato para cortar antes de tiempo (O. Sánchez, comunicación personal, 16 de marzo de 2018). Lo anterior es de gran preocupación ya que causa pérdidas económicas tanto para los productores como para FONAFIFO.

En la Zona Huetar Caribe se encuentran 72 contratos de PSA de reforestación plantados con melina (G. Navarrete, comunicación personal, 9 de mayo de 2018), lo que la convierte en un área de interés en el estudio de la Nectria. Debido a las condiciones climáticas aptas de esta zona para el desarrollo de dicha especie, se estiman 77 380 ha óptimas para reforestar con esta especie (Martínez, 2015). Sin embargo, la Nectria presenta una gran amenaza para las plantaciones y sistemas agroforestales con dicha especie.

Surge la duda de si la incidencia de la enfermedad se presenta por razones climáticas, de sitio o de manejo y en este sentido, este trabajo propone identificar donde están ubicadas las plantaciones de melina afectadas por Nectria en la Zona Huetar Caribe y su relación con las variables de clima, suelo y manejo, con el fin de determinar si existen zonas que por sus características no se recomienda reforestar con esta dicha especie. Esta información será de gran utilidad tanto para los tomadores de decisiones en el FONAFIFO como para los profesionales, regentes y los productores.

Objetivos

Objetivo general:

Identificar las plantaciones de *Gmelina arborea* (Melina) afectadas por *Nectria* sp. (Nectria) en la Zona Huetar Caribe y su relación con las variables de suelo, clima y manejo.

Objetivos específicos:

- a. Construir una base de datos en donde estén disponibles las características de suelo, clima y manejo para los proyectos de reforestación con melina.
- b. Determinar el porcentaje de incidencia de *Nectria* sp. en una muestra de las plantaciones de melina y su relación con las variables de clima, suelo y manejo.
- c. Elaborar un mapa de vulnerabilidad para detectar las zonas con mayor tendencia a altos porcentajes de incidencia de la *Nectria* sp.

Hipótesis

La hipótesis que se plantea está orientada a determinar si existe una correlación entre la aparición e incidencia de la *Nectria* sp. (Nectria) y las variables de clima, suelo y manejo.

La hipótesis estadística es:

Ho: No existe relación entre la incidencia de la Nectria con las variables de clima, suelo y manejo.

Ha: Sí existe relación entre la incidencia de la Nectria con las variables de clima, suelo y manejo.

Revisión literaria

1. *Gmelina arborea*

Gmelina arborea conocida popularmente como melina en Costa Rica y como melina, Yemane o Gumhar en otros países, pertenece a la familia de las Lamiaceae. Esta especie es originaria del continente asiático específicamente en Malasia, Birmania, Nepal, Pakistán, entre otras provincias sureñas de China (Muñoz, 1998). La melina posee un fuste recto que puede llegar a medir 30 m de altura y hasta 2 m de diámetro, su copa es amplia en lugares abiertos, sin embargo, en plantaciones es más compacta (Ávila & Betancourt, 2014).

La madera de esta especie es utilizada para carpintería, contrachapados, pisos, marcos de puertas, entre otras, en Costa Rica principalmente se usa para la construcción de tarimas (González & Serrano, 2004).

1.1 Plantaciones de melina en Costa Rica

Las primeras plantaciones de melina se dieron en el año 1966 en Manila de Siquirres, Limón; esta finca contaba con 2000 ha plantadas con esta especie y la semilla fue usada como parte de un ensayo de procedencias (Lega, 1988). El primer uso que se le dio a los monocultivos de esta especie fue para la elaboración de papel, no obstante, Costa Rica no cuenta una industria papelera y como la especie posee una baja capacidad calórica tampoco sirvió para leña. Consecuentemente, Costa Rica utiliza esta especie como fuente de materia prima para madera aserrada (Moya, 2004).

Para el periodo de 1990 a 1995 ya existía un volumen de melina significativo en el país, sin embargo, los aserraderos no contaban con la maquinaria ni la capacitación para procesar trozas de bajas dimensiones. Como solución al sobreabastecimiento de esta madera se recurrió al negocio de las tarimas, ya que el mercado era poco exigente pero debido a las altas exportaciones el consumo de madera era muy alto

(Moya, 2003). En construcción, la madera de melina se utiliza para cerchas, columnas, pisos, molduras, mostradores, rodapié, tablilla, vigas sólidas, vigas laminadas, columnas laminadas, tableros laminados, marcos de puertas y ventanas y contrachapado (Moya 2000). También se utiliza para la artesanía (González & Serrano, 2004).

Los mejores sitios para plantar melina se encuentran en las partes bajas de terrenos donde tienen mayor disponibilidad de agua y nutrientes. Esta especie no responde bien a suelos erosionados, compactados o terrenos con topografía muy quebrada (Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O., Arguedas, M. 2004). Aunque la especie sea capaz de adaptarse a varias condiciones, su mejor rendimiento se da cuando se planta en suelos con texturas de arenosas a francas, profundos, húmedos y con buena capacidad de drenaje (Rojas, et al, 2004).

Entre los factores negativos limitantes que afectan el desarrollo de la especie, se ha encontrado el viento, suelos arcillosos, poca profundidad del suelo y bajo contenido de materia orgánica, además, es una especie sensible a la competencia por maleza (Rojas, et al, 2004). Las plantaciones de melina juegan un papel muy importante en la economía del país y esto se ve reflejado en el informe estadístico del año 2014 del SIREFOR, donde se reporta que la melina es la segunda especie con más volumen aprovechado en ese año, después de la teca. Como se ha mencionado anteriormente, la madera de dicha especie es principalmente utilizada para la fabricación de tarimas y para el año 2016 la venta de este producto generó \$ 66 millones para el país (ONF, 2016).

1.2 Pagos por servicios ambientales (PSA) de reforestación

El PSA consiste en una recompensa monetaria que brinda el Estado por medio de FONAFIFO como reconocimiento por los servicios ambientales producidos por las actividades de conservación y manejo bosque, así como reforestación, regeneración y sistemas agroforestales (ONF, 2018).

Los servicios ambientales que reconoce la Ley Forestal están (ONF, 2018):

- a) Mitigación de los gases de efecto invernadero (fijación, reducción y almacenamiento de CO₂).
- b) Protección del recurso hídrico.
- c) Protección de la biodiversidad.
- d) Belleza escénica.

Las modalidades y actividades vigentes para participar en proyectos de PSA son las siguientes (Sánchez & Navarrete, 2017):

- 1. Recuperación de la cobertura forestal:
 - 1.1 Reforestación con especies de rápido crecimiento.
 - 1.2 Reforestación con especies de mediano crecimiento.
 - 1.3 Reforestación con especies en veda.
 - 1.4 Sistemas agroforestales.
 - 1.5 Sistemas agroforestales con especies en veda.
 - 1.6 Regeneración natural.
- 2. Mantenimiento de la cobertura forestal:
 - 2.1 Protección de bosque
 - 2.2 Protección del recurso hídrico
 - 2.3 Manejo de bosque

Melina como se mencionó anteriormente, es una de las especies más utilizadas para los proyectos de reforestación en Costa Rica. La categoría en donde entra esta especie sería la modalidad de reforestación con especies de rápido crecimiento y/o sistema agroforestal. El monto por pagar al productor en la actividad de reforestación con especies de rápido crecimiento es de ₡649.538/ ha/año durante la vigencia del contrato (10 años) y de ₡940/árbol/año durante el periodo del contrato (5 años) en la actividad de sistema agroforestal. El pago para la actividad de reforestación de rápido crecimiento se distribuye en 5 pagos, al año uno 50 %, año dos 20 %, año tres 15 %, año cuatro 10 % y finalmente al año cinco el 5 % restante, mientras que, la actividad de sistemas agroforestales al año uno se paga el 50 %, año tres 25 % y al año cinco 25 % (ONF, 2018).

Algunos de los impactos positivos que ha causado FONAFIFO al país son la financiación de más de 1,2 millones de hectáreas y el apoyo a comunidades rurales, ya que se reporta que se transfiere más de US\$30 millones/año por concepto de pago por los servicios ambientales a estas comunidades (FONAFIFO, 2017).

Constantemente FONAFIFO apunta a optimizar el programa de PSA por medio de decretos, resoluciones o modificaciones. Por ejemplo, el Decreto N° 39058-MINAE (2015) entre otras actividades, exige a los regentes incluir en el estudio técnico un análisis de suelos y recomendar según los resultados el tipo de fertilización requerida, asimismo, incluir una evaluación de los factores físico - ambientales, ecológicos y silviculturales para recomendar las especies y sitios a plantar, con el objetivo de incrementar la eficiencia y productividad de los proyectos de reforestación de PSA.

1.3 PSA de reforestación y SAF en Zona Huetar Caribe

La melina es una especie cuya silvicultura es muy conocida en el país, por lo que es una elección popular a la hora de establecer proyectos de reforestación con esta especie, además de que existen zonas en el país que son aptas para su buen desarrollo. Una de estas Zonas es la Huetar Caribe que presenta los regímenes

climáticos requeridos. Como se ha mencionado anteriormente, para el desarrollo de esta especie se necesita suelos aireados, bien drenados, de texturas livianas francas, franco-arenosas, franco-arcillo arenosas, profundos, por lo que la Zona Huetar Caribe cumple con estos requisitos, y se han contabilizado 77,380 ha aptas en esta zona (Martínez, 2015). La Zona Huetar Caribe o también conocida como Huetar Atlántica, comprende los cantones de Guácimo, Limón, Matina, Pococí, Siquirres y Talamanca (InfoAgro, 2007)

Según el informe de rendición de cuentas de FONAFIFO (2016) para la Zona Huetar Caribe, se tenían 696,10 ha con contratos de la modalidad de reforestación y 555, 60 ha con contratos de sistemas agroforestales, y entre las especies más utilizadas por sus requerimientos ambientales se encuentra la melina.

2. *Nectria* sp. (*Nectria*)

Nectria sp. es un teleomorfo (estadío reproductivo sexual) del hongo perteneciente a la familia de los *Fusarium*. Este hongo se caracteriza por ser saprófito en la descomposición de sustratos vegetales (Acevedo, 2013).

Este hongo es el orden Ascomycete por lo que producen un micelio con septos, esporas sexuales, dentro de un saco (asea) y esporas asexuales (conidios). Infecciones provocadas por *Nectria* sp. son más severas en árboles jóvenes ya que el hongo circunda el tronco o las ramas más gruesas. En árboles maduros la enfermedad disminuye el vigor, valor y productividad en ellos (Agrios, 2005).

La *Nectria* sp. produce canchros o chancros tanto en el tronco como en ramas. En árboles jóvenes, el área necrótica de los tejidos corticales puede abarcar el perímetro del árbol, provocando la muerte de la parte apical del fuste y la copa. Como síntoma de la presencia de la enfermedad muchos árboles rebrotan por debajo de la mitad del fuste y además presentan “lloraderos” de savia en los puntos de poda, los cuales se tornan negruzcos (Arguedas, 2004). En un cancro activo se pueden observar las

estructuras reproductivas que se llaman peritecios, son de color rojo o naranja de forma ovalada (Cribián, 2007).

2.1 *Nectria sp. en G. arborea*

Una de los patógenos que más causa daño a la melina es la *Nectria sp.*, que, junto con altas densidades de árboles y suelos no compatibles con los requerimientos de la melina, se ven asociados con altas mortalidades de grupos de árboles (Arguedas, 2004).

Uno de los síntomas es la marchitez del follaje, que posteriormente va a caer debido a que los conductos donde transita el agua y nutrientes se cortan por el anillamiento que produce el hongo (Arguedas, 2004). Otro de los síntomas es la producción de “lloraderos” de savia que se tornan de color negruzco, también el árbol afectado suele rebrotar en la parte inferior como modo de autodefensa (Arguedas, 2004). Además, alrededor de las zonas negruzcas del fuste se puede percibir un olor fétido a rumen (Arguedas, Rodríguez, Moya & Berrocal, 2018).

El manejo de esta enfermedad es difícil, ya que al inicio cuesta identificarla y habitualmente no se puede detectar la presencia del cancro, para ello hay que realizar cortes en donde se presentan los rebrotes (Arguedas, 2004). Lo mejores resultados en plantaciones se logran con la prevención de la enfermedad, otra opción para combatir este problema es el mejoramiento genético buscando los individuos que son más tolerantes a la *Nectria* para reproducirlos y así tener soluciones a mediano y largo plazo (Méndez, 2011).

Como solución a los múltiples casos de *Nectria*, FONAFIFO decidió capacitar tanto a los productores como a los regentes sobre la valoración en campo de la muerte de la melina en el año 2016. En la capacitación se utilizó la escala diagramática para la categorización de la severidad de la pudrición del tronco de melina desarrollada por Salas (2012).

En Costa Rica debido a la severidad de la *Nectria*, ha habido varios intentos por disminuir la incidencia de esta enfermedad en las plantaciones (O. Sánchez, comunicación personal, 16 de marzo de 2018). Existen varias experiencias de esfuerzos como lo demuestra el Taller de intercambio de experiencias de manejo y control de *Nectria* sp. por productores forestales en la Región Huetar Norte de Costa Rica (Consejo Forestal, 2015). En esta actividad se exponen actividades de manejo preventivo, como la selección del terreno, aplicación de enmiendas, actividades silviculturales y selección de clones.

2.1.1 Relación de las variables clima, suelo y manejo en la afectación de la *Nectria* sp. en las plantaciones

Entre los factores relacionados con la aparición del cancro de la melina se encuentran (Consejo Forestal, 2015): la práctica incorrecta y excesiva de podas, control de malezas deficiente y altas densidades de siembra. Además de las variables dichas anteriormente, la melina tiene requerimientos climáticos específicos como precipitación de 2000 mm - 2500 mm, 8 a 9 meses de lluvia y una temperatura entre 24 y 29 °C (Rojas, et al, 2004), estas condiciones son necesarias para que la melina se pueda desarrollar en Costa Rica y así propiciar un crecimiento fuerte para hacer la especie menos susceptible.

De acuerdo con los métodos de análisis de asociación entre factores y de clasificación las variables explicativas de la presencia de la *Nectria* en plantaciones de melina serían las variables climáticas, de suelo (fertilidad) y de manejo (la práctica de podas, rodajas, raleos, o y densidad de siembra); y la variable respuesta sería la aparición y porcentaje de incidencia de *Nectria*.

2.1.2 Árboles de Decisión y *Random Forest* en R.

Los árboles de decisión son herramientas útiles para la clasificación y predicción de una variable, en donde el algoritmo se encarga de escoger las variables predictoras que mejor separen los datos en grupos que corresponden con las categorías de la

variable dependiente (Mendonza, 2018). En este estudio, el árbol de decisión buscaría cuál de las variables de suelo, clima y manejo predice mejor la afectación de la Nectria en las plantaciones.

Por su parte *Random Forest* es un algoritmo que crea múltiples árboles de decisión independientes con muestras de datos aleatorios de igual distribución, es decir el algoritmo selecciona cada vez un set de datos diferente (con remplazo) para la construcción de cada árbol. Cada uno de los árboles se diseña para adaptarse a un escenario diferente, aunque parecido al caso de estudio, lo que le da la ventaja sobre realizar un solo árbol de decisión ya que *random forest* puede enfrentarse a escenarios desconocidos (Porrás, 2015).

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se extrajo la información de manejo contenida en los expedientes de los proyectos de PSA con melina de FONAFIFO. Se describieron las variables de clima y suelo para cada proyecto. Posteriormente, se realizaron visitas de campo en una muestra de los proyectos de reforestación para comprobar la presencia de la enfermedad. Para demostrar la relación de las variables de suelo, clima y manejo con la presencia e incidencia de la Nectria, se realizaron distintas pruebas estadísticas y se procedió a construir un mapa de vulnerabilidad de la melina al ataque de la Nectria.

1. Descripción del Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en proyectos de reforestación de melina sujetas a PSA dentro de la Zona Huetar Caribe, dentro del área de estudio (figura 1) también se incluyó Sarapiquí ya que existen proyectos ubicados fuera de la Zona Huetar Caribe, pero por su cercanía a la Oficina Regional Caribe Norte se incluyen en la zona de estudio.

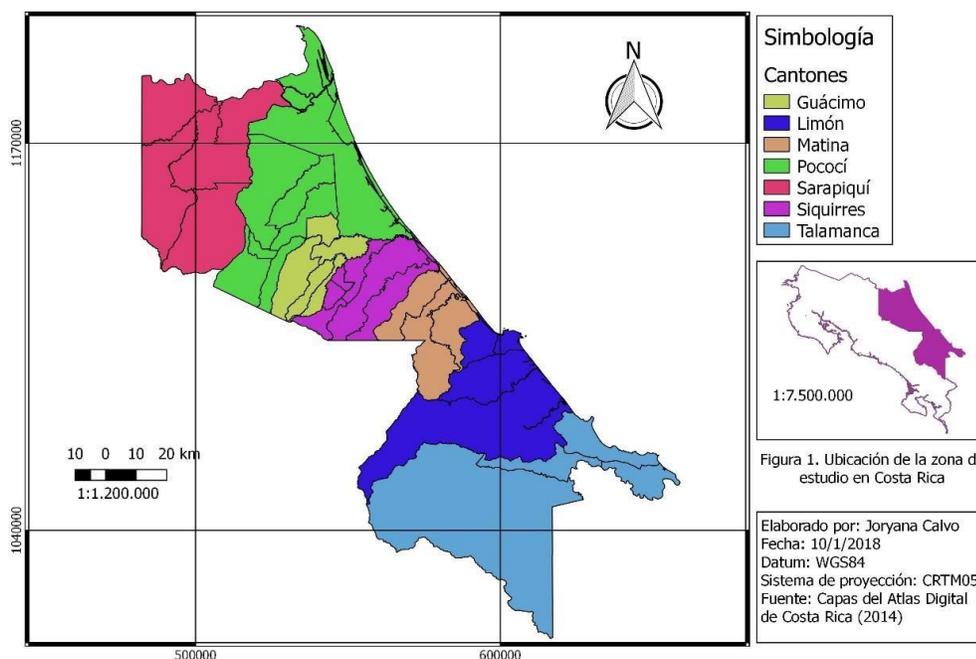


Figura 1. Zona de Estudio.

La Región Huetar Caribe registra una temperatura promedio anual que varía de 27 a 30 °C en las zonas más bajas. La precipitación promedio anual va desde 2000 mm, en el interior del Valle del Reventazón, hasta 5500 mm en la zona del Delta Río San Juan. Los suelos suelen ser del tipo inceptisoles, entisoles y andisoles (Comité Sectorial Regional Agropecuario, 2007).

2. Recolección de Datos

2.1. Datos extraídos de los expedientes de los proyectos de PSA de FONAFIFO

Se extrajo la información de manejo e incidencia de *Nectria* contenida en los informes de regencia de los expedientes de los proyectos de reforestación de pagos por servicios ambientales de FONAFIFO. Se utilizaron los proyectos admitidos para el periodo de 2010-2017. Debido a que la información de manejo era muy variada se realizó una clasificación de calidad de manejo según se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de manejo silvicultural de los proyectos (2010-2017) de reforestación con melina para la Zona Huetar Caribe.

Calificación	Actividades silviculturales
Excelente manejo (1)	Control de malezas, aplicación de abono y cal, raleos oportunos, cortes sellados con fungicidas, poda selectiva, control biológico
Buen manejo (2)	Control de malezas, aplicación de abono, raleos oportunos, cortes sellados con fungicidas, podas no selectivas
Manejo regular (3)	Abono, control de malezas
Manejo deficiente (4)	Solo presenta una actividad silvicultural

2.2. Datos climáticos

Para la descripción de las variables climáticas se utilizaron datos de precipitación (mm/día), velocidad del viento (m/s/día), temperatura máxima y mínima (°C/día), humedad relativa (fracción/día) y radiación solar (MJ/m²/día) obtenidos del sitio *Global Data for SWAT* (Suranjana, 2010).

Se seleccionaron las estaciones climáticas cercanas a la zona de estudio, las cuales fueron 9 en total. Se descargaron datos desde el año 2000 hasta el 2013, debido a que el año 2014 presentaba los datos hasta el mes de julio.

Los datos fueron descargados como archivos delimitados por comas (csv) y por medio de tablas dinámicas del programa de Microsoft Excel se calcularon los promedios mensuales y anuales. Luego se determinó la temperatura media calculando el promedio entre temperatura mínima y máxima, y se calculó la evapotranspiración con el método de Thorntwaite (1948) utilizando los datos mensuales de temperatura.

Como resultado se obtuvo una hoja de Excel con el promedio anual de cada variable climática para cada una de las 9 estaciones, la cual se guardó como csv y luego se convirtió en una capa de puntos tipo shape en el programa QGIS. Este archivo se utilizó para realizar una interpolación IDW donde el atributo de interpolación fue cada una de las variables climáticas. Posteriormente se utilizó la herramienta de estadísticas de zona para calcular el promedio de cada una de las variables para cada finca. En la figura 2 se presenta el mapa con la ubicación de las estaciones climáticas.

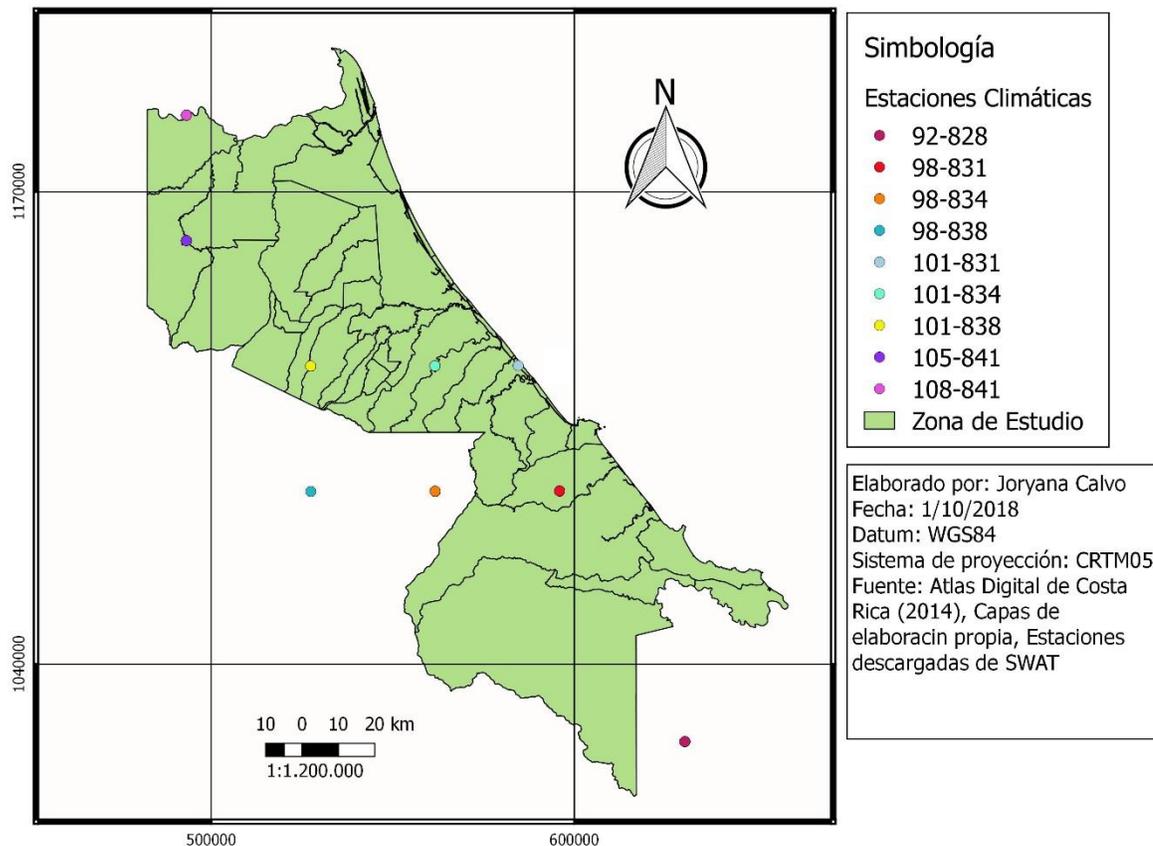


Figura 2. Ubicación de las estaciones climáticas de SWAT utilizadas para la descripción de las variables. Costa Rica.

2.3. Variables edáficas

Para la determinación de las características de suelo se utilizó la base de datos adjunta a la capa “Suelos subórdenes” del Atlas Digital de Costa Rica (2014). Se filtraron los cantones que se encuentran dentro del área de interés (Pococí, Sarapiquí, Limón, Siquirres, Talamanca y Matina). Las variables edáficas utilizadas fueron las siguientes: nivel de Ph-H₂O, el porcentaje de acidez y saturación de acidez, además de la cantidad de magnesio (cmol/L), potasio (cmol/L), CICE (cmol/L), fósforo (mg/L), zinc (mg/L), cobre (mg/L), hierro (mg/L), manganeso (mg/L) y calcio (cmol/L). Para clasificar los valores de estas variables se utilizaron los niveles críticos, generales y

condiciones altas, medias y bajas de “*La guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica*” de Méndez & Bertsch (2012). Se asignó la calificación de 1 para los valores que se encontraban entre el nivel crítico, 2 para los valores entre la categoría media y 3 para los valores entre la categoría alta. De esta manera, las variables edáficas se convirtieron en variables categóricas. En el cuadro 2 se presentan las categorías de los valores de cada variable edáfica.

Cuadro 2. Niveles críticos y condiciones medias y altas para interpretar los análisis de fertilidad de los suelos. (Valores resaltados en rojo representan niveles que pueden ser problemáticos según cada variable).

Variable edáfica	Unidades	Categoría		
		Nivel crítico	Media	Alta
pH en agua		<5,5	5,6-6,5	>6,5
Acidez	cmol (+) /L	<0,5	0,5-1,5	>1,5
Saturación de bases	%	<10	10 - 50	>50
CICE	cmol (+) /L	<5	5 - 25	>25
Ca	cmol (+) /L	<4	4-20	>20
Mg	cmol (+) /L	<1	1-5	>5
K	cmol (+) /L	<0,2	0,2-0,6	>0,6
P	mg /L	<10	10 - 20	>20
Zn	mg /L	<2	2 - 10	>10
Mn	mg /L	<5	5 - 50	>50
Fe	mg /L	<10	10-100	>100
Cu	mg /L	<2	2- 20	>20

Valores resaltados en rojo representan niveles que pueden ser problemáticos según cada variable.

Fuente. Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica (2012).

Para asignar una categoría de las variables edáficas anteriormente mencionadas a cada finca, en el programa de QGis se utilizó la herramienta de “Polígonos de Voronoi”. Posteriormente se creó una capa ráster para cada uno de los atributos resultantes. Para asignar un valor a las variables edáficas de cada finca se utilizó la herramienta de estadísticas de zona en el programa de QGis.

La información de manejo, clima y suelo fue digitada en la base de Excel de Registro de Proyectos de PSA de reforestación brindada por FONAFIFO. Dicha base contiene información de registro sobre los proyectos, datos de diámetro, altura y área basimétrica de los árboles, los cuales fueron extrapolados a diámetro promedio, altura promedio y área basal por hectárea, en el caso de que se tuviera la información del área de las parcelas permanentes de medición.

2.4. Comprobación de la presencia de la Nectria en campo

De la totalidad de los proyectos de PSA con melina se seleccionó una muestra del 10% para su revisión en campo. El proceso de selección de la muestra se inició con arranque aleatorio y para asegurar que las fincas a visitar estuvieran bien distribuidas a lo largo de la zona de estudio, los proyectos se ordenaron de menor a mayor de acuerdo con sus coordenadas x y coordenadas y. Se siguió la descripción sintomatológica de Nectria de Arguedas (2004) para la detección de este patógeno en las plantaciones. Los parámetros visuales de los daños para identificar la enfermedad en los árboles fueron los siguientes: follaje escaso o marchitado, rebrotes en la parte inferior del fuste, “lloraderos” o exudaciones, necrosis y zonas del fuste resquebrajadas.

En el cuadro 3 se muestran los detalles de los proyectos visitados como parte de la comprobación en campo de la enfermedad de la Nectria. Además, en la figura 3 se muestra la distribución geográfica de las fincas evaluadas.

Cuadro 3. Información contenida en los expedientes de los proyectos de reforestación visitados para la comprobación de la presencia de la Nectria en campo.

Contrato	Ha	Inicio contrato	Fin contrato	Ataque de Nectria
SA-01-20-0133-2012	14,3	27/06/2012	26/06/2027	Sí
PO-01-20-0135-2012	58,3	08/08/2012	08/08/2027	No
CN-01-20-0309-2014	57,8	14/11/2014	14/11/2029	Sí
CN-01-20-0186-2012	299,7	06/12/2016	06/12/2026	No
LM-01-20-0144-2012	8	05/09/2012	05/09/2027	No
LM-01-20-0031-2013	14,3	29/07/2013	29/07/2028	No
LM-01-20-0191-2011	22	04/10/2011	02/10/2026	Sí

Distribución geográfica de la muestra de proyectos de PSA con Melina en la Zona Huetar Atlántica, Costa Rica

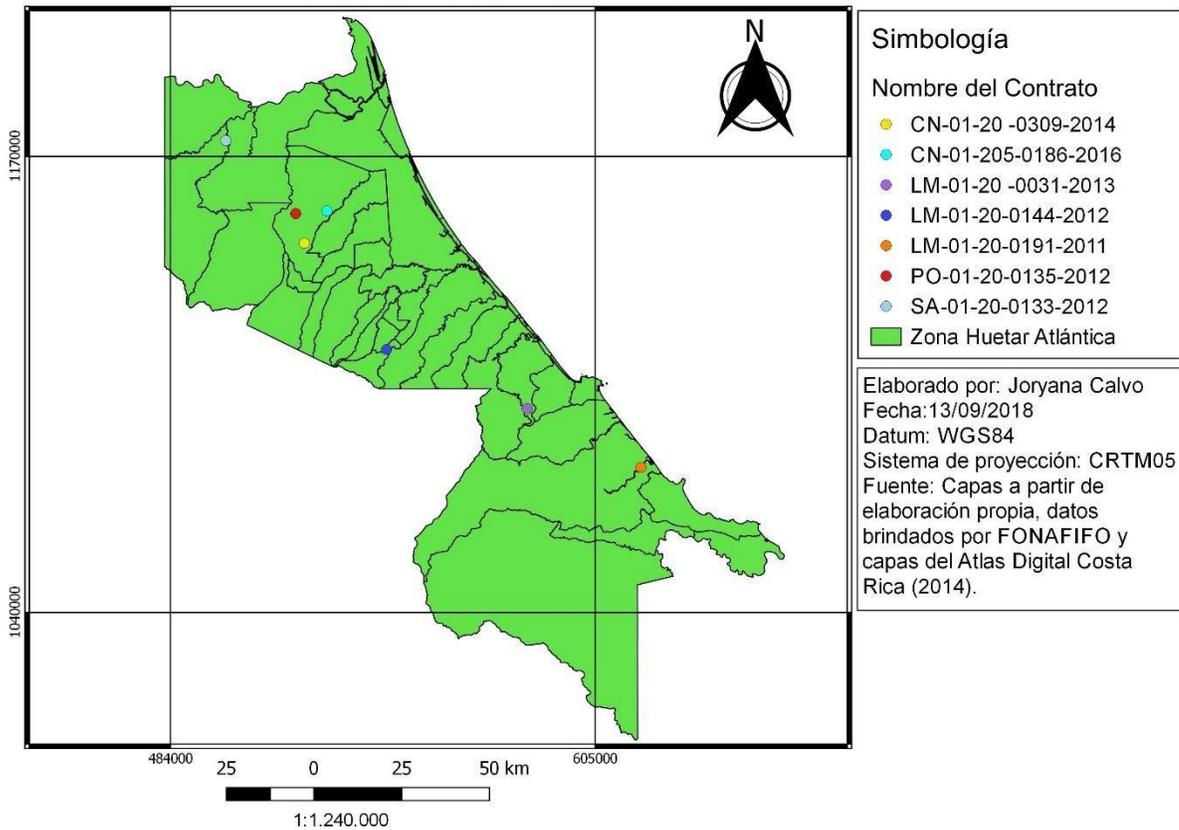


Figura 3. Distribución geográfica de las fincas visitadas en la Zona Huetar Caribe.

2.4.1 Diseño de Muestreo

Para evaluar la incidencia de *Nectria* en los proyectos, se trazaron 2 transeptos perpendiculares procurando que estos formaran una cruz que cubriera la mayor área posible dentro los cuales se evaluó cada árbol presente (ver anexo 1-7). Para facilitar el trazado y ubicación en campo, se utilizó QGIS (2.18.4) donde se visualizó la capa (archivo tipo shape) del área efectiva bajo contrato de PSA de los proyectos visitados. Las coordenadas de los puntos de inicio de los transeptos de cada finca se guardaron en el dispositivo de sistema de posicionamiento global (Garmin 64s) para su

localización en campo. El estado fitosanitario de las plantaciones se registró en un formulario donde se anotó el número de árbol y su condición (enfermo o sano).

3. Determinación del Porcentaje de Incidencia

Posterior a la recolección de datos se calculó el porcentaje de incidencia para cada finca utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Incidencia} = \frac{\text{número de árboles enfermos}}{\text{número de árboles evaluados}} * 100 \quad (1)$$

4. Análisis de la correlación de las variables de suelo, clima y manejo con la presencia e incidencia de la Nectria.

Para la selección de las variables que se asocian con la aparición e incidencia de la Nectria, primero se elaboraron tablas de contingencia en el programa de PAST (3.20), después por medio de gráficos se verificó si existía alguna tendencia para las variables que no demostraron significancia con las pruebas estadísticas.

En el programa RStudio (versión 1.1.456) se analizaron los datos usando árboles de clasificación con el logaritmo *Tree*, para así identificar variables que tuvieran influencia sobre la aparición e incidencia de la enfermedad, así mismo se utilizó el algoritmo de *Random Forest* para conocer la importancia de cada una de las variables. Los códigos de programación se muestran los anexos 8 y 9.

Finalmente, en R se realizó una regresión lineal múltiple para identificar las variables predictoras significativas de la incidencia de Nectria, además se utilizó la técnica de *stepwise regression* con backward selection, el cual a cada paso elimina gradualmente las variables insignificantes hasta que se produzca el modelo óptimo (Dunkler, Plishe, Leffondré & Heinze, 2014).

El análisis de la correlación de las variables se hizo en dos partes. Primeramente, se utilizó como variable dependiente la presencia de la Nectria en la plantación, luego, se utilizó como variable dependiente el porcentaje de incidencia de la Nectria

reportado por el regente. De modo que, en el primer análisis la variable dependiente fue categórica de tipo booleano y el segundo análisis la variable a predecir fue continua.

5. Elaboración de Mapa de Vulnerabilidad

Para la preparación del mapa de vulnerabilidad de la incidencia de *Nectria* en plantaciones de melina, se utilizó el modelo producido por la regresión múltiple lineal con el método *stepwise regression*, donde la variable dependiente fue el porcentaje de incidencia de la *Nectria* reportada por el regente y las variables independientes fueron las determinadas como significativas por la regresión.

Para la construcción del mapa en QGIS (2.18.4), cada capa ráster de las variables independientes del modelo se multiplicó por sus respectivos coeficientes de regresión, las capas resultantes de cada multiplicación se sumaron para producir la predicción del porcentaje de incidencia de la *Nectria*.

Resultados y Discusión

1. Información de expedientes

De los 98 expedientes de contratos de PSA de reforestación periodo (2010-2017) examinados se obtuvo un total de 72 proyectos reforestados con melina, de los cuales 39 reportaron el ataque de Nectria, 30 mencionaron que no tenían incidencia y 3 no contenían información respecto a la enfermedad. A continuación, se presenta el cuadro detallando la información recolectada de los expedientes.

Cuadro 4. Información recolectada de en la base de datos de los expedientes de los contratos de PSA 2010-2017.

Encabezado	Definición
Contrato	Número de contrato según el registro
Regente Nombre	Nombre del regente a cargo de la plantación
N, Colegiado	Número de colegiado del regente
Ha contrato	Número de hectáreas acordadas en el contrato
N, Cuota	Número de cuota desembolsada (1°, 2°, 3°, 4 ó 5°)
Folio real finca	Número de folio de la finca sometida a PSA
Mortalidad inicial (%)	Mortalidad inicial de los árboles plantados
Mortalidad actual (%)	Mortalidad reportada a la fecha
Tipo de arreglo SAF (ND)	El tipo de arreglo de sistema agroforestal (si aplica)
Bloque	El nombre del bloque en caso de que la finca esté dividida

ha bloque	El número de hectárea de casa bloque
N, Parcela	El número de parcela permanente
Área de la parcela (m ²)	El área de cada parcela
Longitud centro parcela (X)	La coordenada x del centro de parcela
Latitud centro parcela (Y)	La coordenada y del centro de la parcela
Sistema de referencia	El sistema de referencia geográfica (CRTM05, WGS84)
Densidad inicial (árboles/ha)	Densidad inicial de los árboles plantados
Distanciamiento inicial (mxm)	Distancia entre los árboles plantados
Raleo (SI/NO)	
Densidad actual (árboles/ha)	La densidad de la plantación a la fecha
% Raleo	El porcentaje de raleo efectuado en la plantación
Fecha de medición (mm,aaaa)	Fecha de medición de las parcelas permanentes
Fecha de Plantación (mm, aaaa)	Fecha de establecimiento de la plantación
Resiembra (si/no)	Si se hizo una resiembra
Edad (Meses)	Edad de la plantación
Especie (nombre científico)	La especie de árbol plantada
Código Clon	Código de clon si aplica
d (cm)	El diámetro medido a la altura de pecho (promedio por parcela)
Ht total (m) *	La altura (promedio por parcela)
ht (medida 1 - estimada 0)	
g (M2/ARBOL)	Área basal de cada árbol medido

G (m ² /ha)	Área basimétrica
Volumen Total (m ³ /árbol) *	Volumen por árbol
Estado sanitario (1-2-3) *	Estado fitosanitario
Forma fuste (1-2-3) *	
Revisor	Nombre de la persona que recolectó la información
Correo del revisor	Correo de la persona que recolectó la información
Observaciones	Observaciones de la información de los expedientes no contemplada en los encabezados anteriores
CONCATENAR	La unión de las celdas "Contrato" y "Revisor"
Ataque Nectria	Indica si tiene o no Nectria según los informes de regencia
Incidencia	El porcentaje de afectación de la Nectria
Fuente semilla/Plantas	Indica el lugar en donde se obtuvieron las plántulas, semillas y si son clones
Año (1)	Detalle del manejo brindado en el año 1
Año (2)	Detalle del manejo brindado en el año 2
Año (3)	Detalle del manejo brindado en el año 3
Año (4)	Detalle del manejo brindado en el año 4
Año (5)	Detalle del manejo brindado en el año 5
Calidad de Manejo	Calificación del 1 a 4 de las actividades silviculturales realizadas
P(mm/anual)	Cuantificación de la precipitación anual

Solar (MJ/m2/añual)	Indica la radiaci3n solar emitida
Hrelativa (fracci3n)	Cuantificaci3n de la humedad relativa
Viento (m/s/añual)	Indica la velocidad del viento
T(°C)	Indica la temperatura media añual
EVPT (mm/añual)	Cuantificaci3n de la evapotranspiraci3n media añual
PH_H2O	Nivel de pH en agua
Acidez (cmol+/L)	Nivel de acidez
Mg (cmol+/L)	Cantidad de Magnesio
K (cmol+/L)	Cantidad de Potasio
CICE (cmol+/L)	Capacidad de intercambio cati3nico efectiva
SA %	Saturaci3n de acidez
P (mg/L)	Cantidad de F3sforo
ZN (mg/L)	Cantidad de Zinc
Cu (mg/L)	Cantidad de Cobre
Fe (mg/L)	Cantidad de Hierro
Mn (mg/L)	Cantidad de Manganeseo
Ca (cmol+/L)	Cantidad de Calcio

2. Comprobaci3n de la Nectria en campo.

En el cuadro 5 se presenta la informaci3n sobre el ataque de la Nectria contenida en los expedientes de las fincas visitadas y lo observado durante la comprobaci3n y evaluaci3n de la enfermedad en campo.

Cuadro 5. Información sobre el ataque e incidencia de la Nectria de los expedientes de PSA de FONAFIFO y lo observado durante la comprobación de campo**.

Contrato	Edad de la plantación en años	Ataque de Nectria en expediente	Ataque de Nectria en campo	Incidencia (%) comprobada en campo
SA-01-20-0133-2012	5	Sí	Sí	51,43
PO-01-20-0135-2012	5	No	Sí	100
*CN-01-20-0309-2014	4	Sí	Sí	92,63
CN-01-20-0186-2016	2	No	Sí	62,26
LM-01-20-0144-2012	6	No	Sí	50
LM-01-20-0031-2013	5	No	Sí	41,18
LM-01-20-0191-2011	6	Sí	Sí	28,57

* En esta finca se muestrearon 4 parcelas permanentes y se promedió la incidencia.

**Fecha de visita a las fincas: 3-7 de setiembre del 2018.

En el cuadro 5 se puede observar que 4 de los proyectos en sus informes de regencia decían no tener la presencia de la enfermedad en la finca, sin embargo, en campo se observó lo contrario y con altos porcentajes de incidencia. De los 3 proyectos que sí reportaron el ataque de la Nectria en los informes de regencia, la presencia de la enfermedad también se observó en campo. No obstante, los datos de porcentaje de incidencia no se pudieron comparar ya que los en los informes de regencia de los proyectos visitados no se reportaron los porcentajes de incidencia.

El proyecto SA-01-20-0133-2012 presenta un porcentaje de incidencia de la Nectria del 51,43 %. Al momento de la visita se observó la presencia de ganado dentro de la plantación y producto de ello inestabilidad en los suelos inclusive árboles derribados. A pesar de que la plantación se cortó y se volvió a plantar recientemente, se observaron árboles con síntomas del ataque de la Nectria como follaje marchitado,

ramas secas y presencia de “lloraderos”, (Arguedas, 2004). Se identificaron cortes sin sellar con algún tipo de pintura o cóctel de fungicidas para evitar la entrada del hongo.

El proyecto PO-01-20-0135-2012 presentó el caso más severo de incidencia de la enfermedad alcanzando 100% de árboles afectados por el hongo. La plantación tiene aproximadamente 6 años, sin embargo, en el campo no se evidenciaron raleos silviculturales, solamente algunos árboles extraídos por motivos de la enfermedad. La ausencia de un raleo silvicultural o fitosanitario pudo contribuir a la alta incidencia de la enfermedad, ya que altas densidades de árboles junto con el hongo de la Nectria se asocian a la mortalidad de los árboles (Arguedas, 2004). Por otra parte, también destacó la cantidad de desechos presentes dentro de la plantación producto de podas y árboles cortados.

El proyecto CN-01-20-0309-2014, también presentó un alto porcentaje de incidencia a pesar de que el último informe de regencia declaraba no tener Nectria. Esta finca se encontraba dividida en bloques de melina y Teca. En los bloques de melina se evidenció la presencia de alta maleza, restos de podas y árboles cortados. En esta plantación si se evidenció la ejecución de raleos por lo que la alta incidencia de la enfermedad se podría atribuir a otra actividad de manejo o a las condiciones de clima y suelo.

En el proyecto CN-01-20-0186-2016 se observó que ya se presentaban árboles afectados por Nectria, a pesar de tratarse de una plantación muy joven (2 años). La finca presentaba drenajes a través de toda la plantación debido a que anteriormente fue una finca bananera según el encargado de la plantación. Se observaron sectores en donde los árboles se encontraban rodeados de charcos contrario a lo que se recomienda en el Manual para productores de melina (Rojas, et al, 2004), dicha situación podría causar estrés al árbol predisponiéndole al ataque de patógenos (Frankel, Juzwik & Koch, 2012). Al momento de la visita se encontraban realizando raleos fitosanitarios para tratar de disminuir la afectación de la Nectria.

El proyecto LM-01-20-0144-2012 declaraba en su expediente que no había afectación por Nectria, sin embargo, la mitad de los individuos evaluados en campo presentaron los síntomas de la enfermedad anteriormente mencionados. Además, se observaron árboles quebrados posiblemente por viento, presencia de maleza densa y de alto porte.

El proyecto LM-01-20-0031-2013, presentó 40 % incidencia, a pesar de que el último reporte de regencia decía que no tenía problemas relacionados con el hongo. El recorrido por esta finca fue restringido por la inestabilidad del terreno el cual presentaba pequeños derrumbes alrededor de la finca y uno grande en el centro de esta lo cual ocasionó pérdida de muchos árboles. A pesar de que no se inspeccionó toda la plantación cabe destacar que el sitio presentaba un suelo cascajoso, sin embargo, se recomienda que la melina se plante en lugares donde los suelos sean profundos, húmedos con buen drenaje y sin obstáculos para el óptimo desarrollo radical (Rojas, et al, 2004). En general se observó un buen control de las malezas en esta plantación.

El proyecto LM-01-20-0191-2011, presentó la menor incidencia de la Nectria y la mayor diferencia entre las demás fincas a nivel visual fue su suelo, ya que no tenía problemas de drenaje ni suelos inestables. El propietario de la finca afirma que el origen del suelo de la plantación es aluvial, lo cual implica que se trata de un suelo rico en minerales y nutrientes que favorece el óptimo desarrollo de la especie (Lugo, 2016). Por otra parte, en esta finca se observó un mejor mantenimiento, se encontraba libre de malezas en la mayoría de la plantación y no se hallaron árboles con bejucos. En general se observó un manejo superior al de las demás fincas, y árboles vigorosos, con grandes dimensiones. Cabe resaltar que la finca ya se encontraba en fase de aprovechamiento al momento de la visita de campo.

3. Correlación de variables de manejo, suelo y clima con la presencia de la Nectria:

Para el análisis de correlación de variables de manejo, suelo y clima se utilizaron los valores de presencia de Nectria reportados por los regentes. En el caso de que el expediente del proyecto reportara que no tenía Nectria, pero en campo se comprobara lo contrario, se decidió utilizar el dato reportado por el regente ya que los propietarios suelen contratar al regente para el seguimiento de los proyectos durante los primeros 5 años, por lo que es posible que cuando el regente hiciera la última visita de campo la enfermedad todavía no se manifestara.

En el cuadro 6, se presentan los resultados de las tablas de contingencia para las variables que muestran asociación con la presencia de la Nectria con las pruebas de Chi cuadrado y Fisher.

Cuadro 6. Resultados de las pruebas estadísticas de Chi cuadrado y Fisher para las variables que demostraron ser significativas para la determinación de la presencia de Nectria.

Variable independiente	Valor p	
	Chi cuadrado	Fisher
Ca	0,0000005	0,0000001
Mg	0,0000173	0,0000087
Humedad relativa	0,0001302	0,0000460
pH_H2O	0,0008879	0,0006251
Calidad de manejo	0,0010246	0,0008091
Radiación solar	0,0061012	0,0021203
Precipitación	0,0180400	0,0152110
P	0,0192420	0,0253740
CICE	0,0414900	0,0352840

Según muestra el cuadro 6, 9 variables independientes demostraron correlacionarse con la presencia de la Nectria en las plantaciones. Las primeras tres variables que demostraron mayor significancia fueron el calcio, magnesio y humedad relativa; en las figuras 4, 5 y 6 se muestran sus respectivas tendencias.

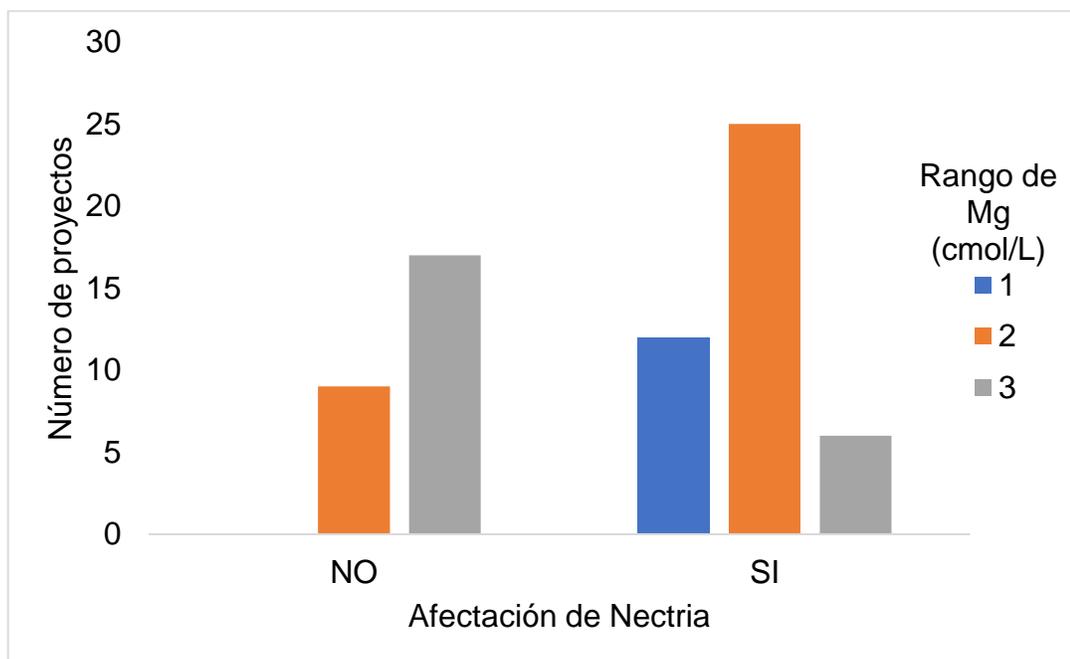


Figura 4. Relación entre la categoría de Mg y la cantidad de proyectos de PSA de reforestación afectados con Nectria.

En el cuadro 6 se muestra que el valor-p para Mg en ambas pruebas estadísticas dio un resultado muy bajo por lo que la probabilidad de que no exista relación entre ambas variables es muy baja. Esta relación se aprecia claramente en la figura 4, en donde la mayor parte de los proyectos que reportan el ataque de Nectria se encuentran en la categoría 2 de Mg (1-5 cmol/L), en contraste, la mayoría de los proyectos que dicen no tener problemas con el hongo se encuentran en el rango 3 de Mg (>5 cmol/L).

Como se puede apreciar en el cuadro 6 ambas pruebas estadísticas afirman que existe relación entre el nivel calcio y la presencia de Nectria, el valor-p dio como resultado un valor muy bajo por lo que la probabilidad de que no haya relación es muy baja. En la figura 5 se aprecia claramente que la mayoría de los proyectos con Nectria se encuentran en la categoría 1 (<4 cmol/L) mientras que los proyectos que no reportan la enfermedad ninguno cae en esta categoría. Por otra parte, se puede observar que la mayoría de los proyectos que no reportan la afectación del hongo se encuentran la categoría 2 (4-20 cmol/L), entonces de acuerdo con la figura 5 se puede inferir que la Nectria probablemente ataca a los sitios que contienen menos calcio en suelo y las probabilidades de que la plantación sufra esta enfermedad disminuyen conforme aumenta el contenido de calcio.

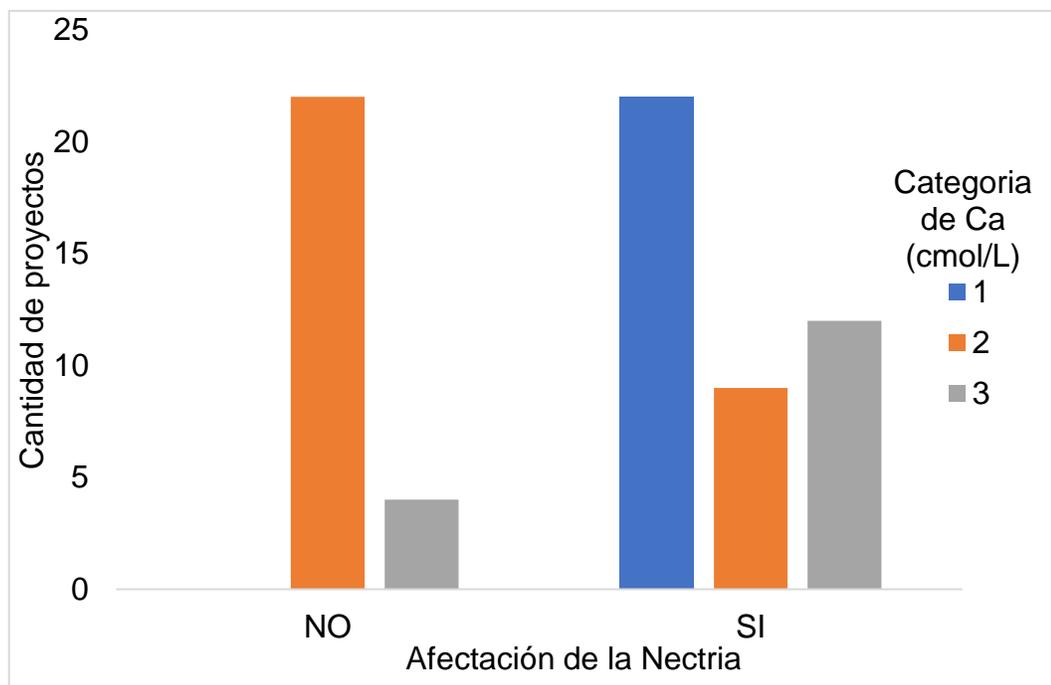


Figura 5. Relación entre la categoría de Ca (cmol/L) y la cantidad de proyectos de PSA de reforestación afectados con Nectria.

Como se observa en el cuadro 6 ambas pruebas estadísticas demuestran que si existe una asociación entre el porcentaje de humedad relativa y la presencia de la Nectria. En la figura 6 se puede observar que para el caso de los proyectos que si reportan Nectria estos se distribuyen en los 4 rangos, con una mayor tendencia al segundo y tercer rango, mientras que para los proyectos que no reportaron el ataque del hongo estos se agruparon en su mayoría en el tercer rango.

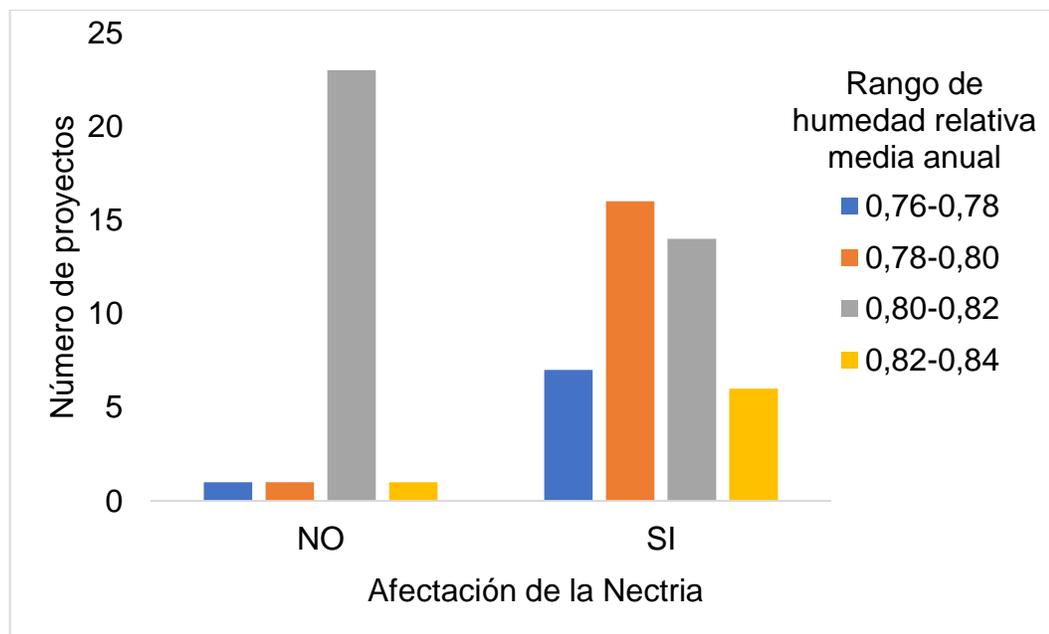


Figura 6. Relación entre el rango promedio anual de humedad relativa y cantidad de proyectos de PSA de reforestación afectados con Nectria.

A pesar de que la calidad de manejo no apareció entre las tres variables más significativas, en la figura 7 se aprecia una clara tendencia en donde la cantidad de proyectos con Nectria disminuye conforme aumenta la categoría de calidad de manejo. Por lo que se podría inferir que la Nectria ataca más a los proyectos en donde las actividades silviculturales no sean las recomendadas para el óptimo desarrollo de la especie.

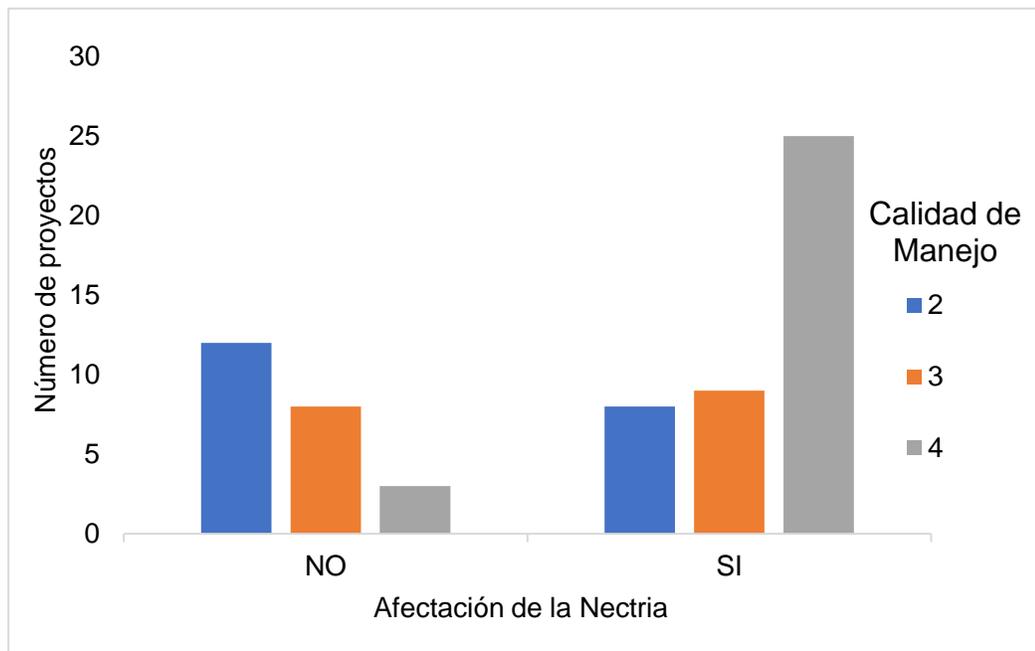


Figura 7. Relación entre la calidad de manejo y cantidad de proyectos de PSA de reforestación afectados con Nectria.

Con respecto a la variable de pH, el comportamiento observado fue una agrupación de la mayoría de los proyectos sanos en la categoría 2 de pH (5,6 - 6,5 %), lo cual era esperado ya que la melina requiere de suelos con valores de pH entre 5 y 6 % para su óptimo desarrollo (Rojas et al. 2004), mientras que los proyectos con Nectria tendieron a agruparse en las categorías extremas de pH (1 y 3). Este comportamiento coincide con lo encontrado por Arguedas et al. (2018) donde se encontró que madera de árboles enfermos procedían de suelos con menores valores de pH.

En la literatura no existen reportes de la radiación solar que requiere la melina para su óptimo desarrollo, sin embargo, se obtuvo una tendencia que indica que los proyectos sanos se agrupan en los porcentajes más bajos de radiación solar (16,67- 19,67 %), mientras que los proyectos afectados por Nectria se agruparon en las clases más altas (19,67-28,67 %).

El comportamiento que se obtuvo con respecto a la variable climática de precipitación fue una menor cantidad de los proyectos afectados con *Nectria* conforme el promedio anual de precipitación aumenta. Mientras que, los proyectos que no reportaron el ataque la mayoría se encuentran en el rango 3 (3192-3592 mm). Según se menciona en el Manual para productores de melina (Rojas, et al, 2004) la cantidad de precipitación media anual ideal es alrededor de 2000 (mm/año), sin embargo, en este estudio los proyectos más cercanos a este valor tendieron a enfermarse con *Nectria*.

Con respecto a la variable edáfica de fósforo el comportamiento obtenido fue un aumento de los proyectos sanos conforme se aumenta el nivel de fósforo en el suelo. Por otra parte, no hubo una tendencia muy clara para la variable de CICE ya que tanto los proyectos sanos y enfermos tendieron a agruparse en la categoría 2 (5 – 25 cmol/ L) de CICE.

Análisis de Datos en R

El algoritmo de clasificación *Tree* de R dio como resultado el siguiente árbol de predicción (Figura 8).

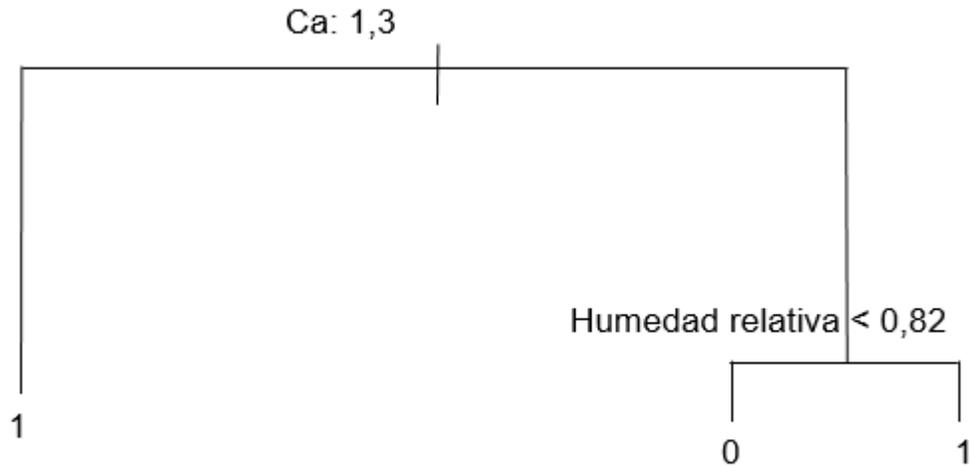


Figura 8. Árbol de predicción para el ataque de la *Nectria* utilizando *Tree* de R.

En la figura 8 se puede observar que las variables que el algoritmo *Tree* seleccionó como predictoras son el nivel de calcio en el suelo y la humedad relativa. Según el árbol si la plantación presenta un nivel calcio dentro de las categorías 1 (<4cmol/L) o 3 (<20cmol/L), presentará la enfermedad definitivamente. Por el contrario, si la plantación se caracteriza por tener valores de calcio dentro de la categoría 2 (4-20 cmol/L) y la humedad relativa es menor que 0,82 entonces no va a presentar la enfermedad, pero si posee humedad mayor la plantación si será atacada con *Nectria*.

El algoritmo de *Random Forest* realizó un total de 500 árboles de clasificación. Para su interpretación se presenta a continuación la matriz de confusión (cuadro 7) de uno de los árboles escogido al azar.

Cuadro 7. Matriz de confusión para la predicción del Ataque de Nectria del algoritmo de Random Forest en R.

		Observado	
		1	0
Predicho	1	37	5
	0	4	19

En la diagonal del cuadro 7 se puede observar que el algoritmo predijo 37 proyectos con afectación de Nectria, cuando el valor real fue de 41, mientras que, cuando el modelo predijo 19 proyectos sin afectación de Nectria el valor real fue de 24, para una exactitud global de 86,15%. De esta manera se puede deducir que el algoritmo se equivoca más cuando la condición de la finca es sana. Los errores de clasificación para cuando se presenta la enfermedad y cuando no es de 0,12% y 0,17%, respectivamente. En general el error de predicción dio como resultado un 13,85%, demostrando la eficiencia del modelo en forma de árbol de decisión para predecir la afectación de la Nectria. Entre las variables más importantes utilizadas por *Random Forest* para la construcción de los árboles se encuentran: Ca, Mg, P, CICE, calidad de manejo, radiación solar, precipitación, humedad relativa y temperatura.

En el cuadro 8 se comparan las variables elegidas como relevantes para cada método utilizado.

Cuadro 8. Variables predictoras elegidas como relevantes para cada método de correlación utilizado.

	Tablas de contingencia	<i>Tree</i>	<i>Random Forest</i>
Calidad de Manejo	x		x
pH en Agua	x		x
Mg	x		x
CICE	x		x
P	x		x
Ca	x	x	x
Precipitación	x		
Radiación solar	x		x
Humedad relativa	x	x	x
Temperatura			x

En el cuadro número 8 se puede observar que las pruebas estadísticas de las tablas de contingencia y *Random Forest* coincidieron en la selección de variables relevantes difiriendo solamente en temperatura y precipitación. Mientras que, el algoritmo *Tree* solo seleccionó Ca y Humedad Relativa como variables predictoras, debido a que este algoritmo utiliza el método de “podar el árbol” en donde se evita que el árbol de decisión contenga muchas variables predictoras y se torne complicado de interpretar (Lawrence, 2018). Cabe destacar que las variables de calcio y humedad relativa resultaron de importancia para los tres métodos de análisis reafirmando su influencia a la hora de predecir el ataque de la enfermedad. La afectación de la *Nectria* aumenta cuando los niveles de calcio son extremos (categorías 1 y 2). Para el porcentaje humedad, el comportamiento observado fue que la mayoría de los proyectos con afectación de la *Nectria* se encuentran en los dos primeros rangos más bajos del

porcentaje de humedad (0,76 - 0,80), mientras que los proyectos no afectados se ubican en su mayoría en tercer rango (0,80 - 0,82).

4. Correlación de variables de manejo, suelo y clima con el porcentaje de incidencia de la Nectria:

En el cuadro 9, se presentan los resultados de las tablas de contingencia para las variables que muestran correlación con el porcentaje de incidencia de Nectria.

Cuadro 9. Resultados de la pruebas de Chi cuadrado y Fisher para las variables que demostraron ser significativas para la determinación del porcentaje de la Nectria.

Variable independiente	Valor p	
	Chi cuadrado	Fisher
Mg	0,0004280	0,0000897
P	0,0020910	0,0053650
Calcio	0,0036340	0,0014200
CICE	0,0038100	0,0084000
Precipitación	0,0107400	0,0065380
Radiación solar	0,0153100	0,0122580
Acidez	0,0579820	0,1521700

Según muestra el cuadro 9, 7 variables independientes demostraron correlacionarse con el porcentaje de incidencia de la Nectria en las plantaciones. Las primeras tres variables que demostraron mayor significancia fueron el calcio, magnesio y fósforo. Cabe destacar que el calcio y magnesio también resultaron entre las variables más importantes para el análisis de estas variables con la presencia de la Nectria.

A continuación, en las figuras 9, 10 y 11 se muestran las tendencias de las variables de calcio, magnesio y fósforo.

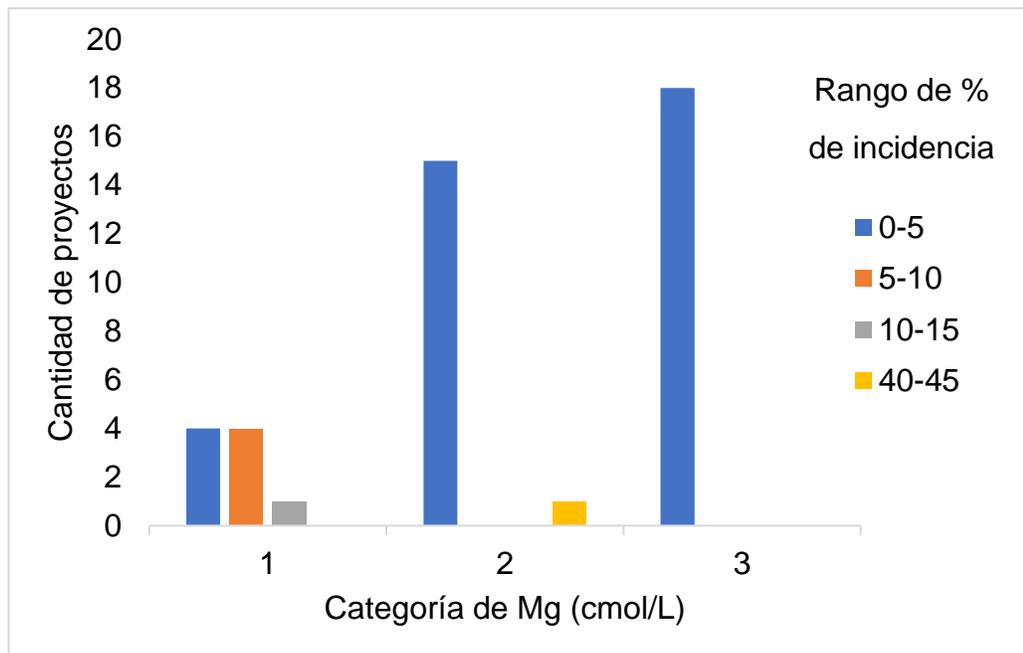


Figura 9. Relación ente la categoría de Mg (cmol/L) y porcentaje de incidencia presente en los proyectos.

Para Mg en la figura 9 se puede apreciar claramente la tendencia en aumento de los proyectos con menores porcentajes de incidencias según aumenta la cantidad de Mg en suelo. En la categoría 3 de Mg (<5 cmol/L) solo se ubican proyectos con un 0-5 % de incidencia por lo que se podría inferir que los menores porcentajes de incidencias de Nectria suelen darse en suelos con alto contenido de Mg. El mismo comportamiento se observa en la figura 4 en donde la afectación de la Nectria disminuyó conforme se aumentó el contenido de Mg en el suelo. El comportamiento observado en las figuras 4 y 9 fue el esperado ya que la melina necesita contenidos de magnesio mayores a 6 cmol/L para su óptimo desarrollo (Martínez, 2015) lo que corresponde a la categoría 3 de Mg en donde se agruparon los proyectos con menores porcentajes de incidencia.

Para la variable edáfica de calcio, en la figura 10, se puede observar que en las categorías extremas de 1 y 3 se ubican los proyectos con los mayores porcentajes de incidencia, mientras que en la categoría 2 de calcio solo se ubican plantaciones con 0 a 5 % de incidencia. El comportamiento observado en la figura 10 concuerda con lo visto en la figura 5 en donde la afectación de la *Nectria* disminuye cuando el suelo tiene calcio de la categoría 2. El comportamiento observado en las figuras 5 y 10 fue el esperado, ya que según Martínez (2015) la melina necesita suelos en donde el contenido de calcio sea mayor a 6cmol/L, lo que corresponde a la categoría 2 de calcio. Además, Arguedas et al. (2018) reporta que se encontraron cantidades bajas de calcio en cenizas de madera de árboles de melina enfermos.

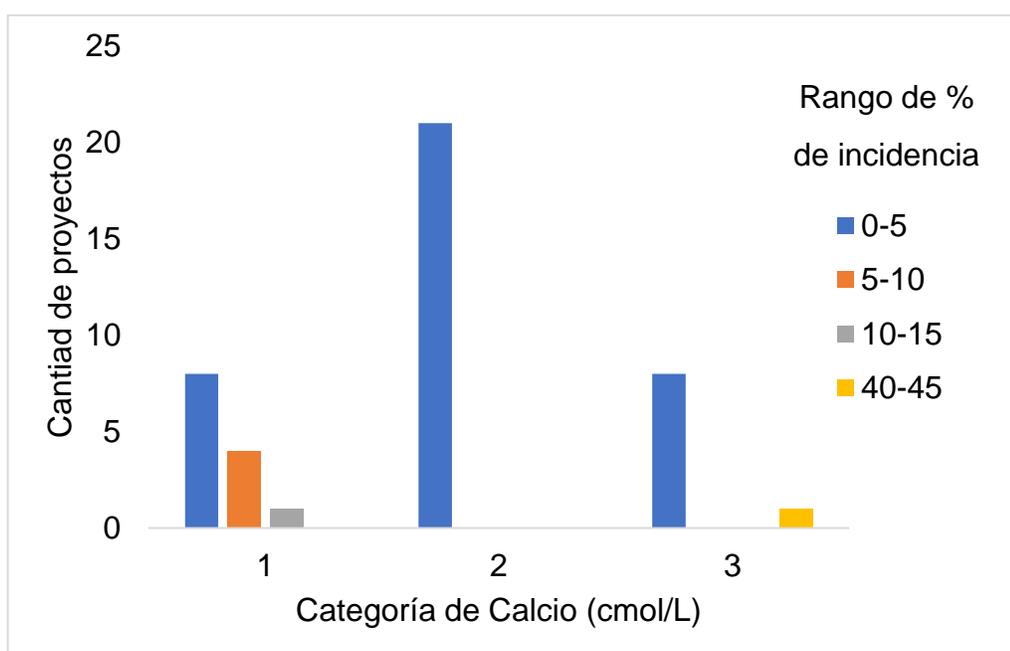


Figura 10. Relación entre la categoría de Ca (cmol/L) y porcentaje de incidencia presente en los proyectos.

En las plantaciones de melina se acostumbra a aplicar fertilizantes ricos en fósforo y nitrógeno al momento de plantar los árboles (Rojas et al. 2004), sin embargo, no existen reportes de las cantidades exactas de fósforo que necesite la melina para su óptimo desarrollo. En la figura 11 la tendencia indica que la cantidad de proyectos con menores porcentajes de incidencias aumenta conforme aumenta la cantidad del elemento P en el suelo.

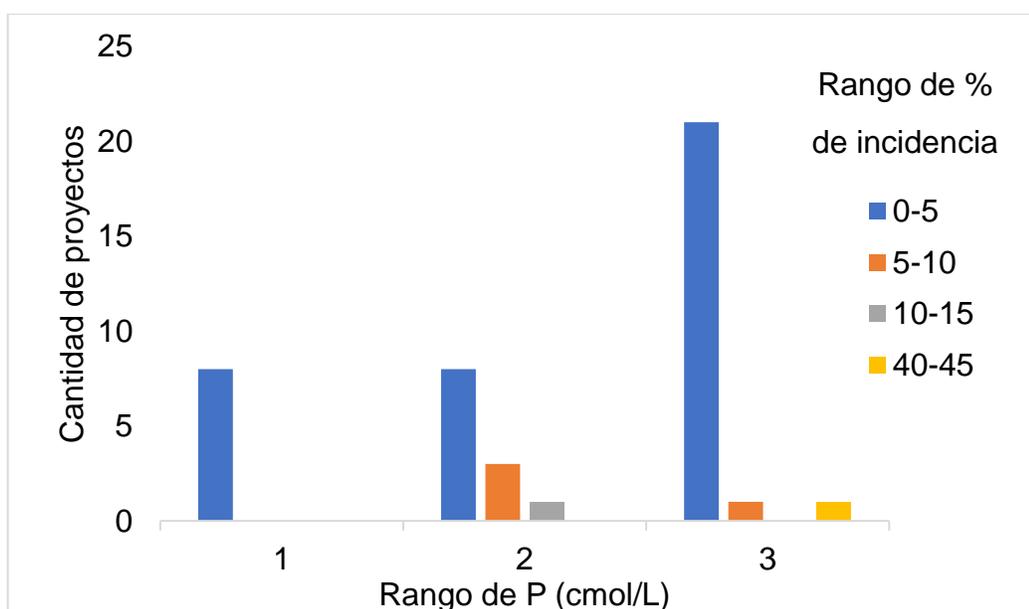


Figura 11. Relación entre la categoría de P(mg/L) y porcentaje de incidencia presente en los proyectos.

La variable de calidad de manejo no resultó como significativa para las pruebas de Fisher y Chi cuadrado, sin embargo, en la figura 12 se puede observar que en la calidad más baja de manejo (4) se agrupan los proyectos con mayores porcentajes de incidencia. El mismo comportamiento se puede observar en la figura 7 en donde la mayoría de los proyectos afectados con Nectria se agrupan en la calidad 4 de manejo.

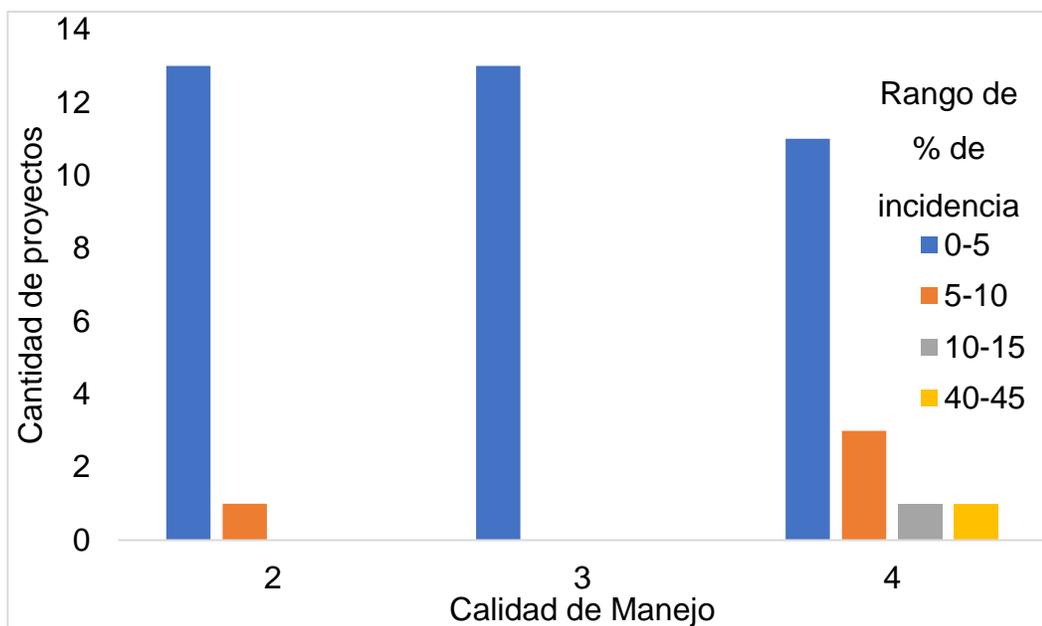


Figura 12. Relación entre la calidad de manejo y porcentaje de incidencia presente en los proyectos.

El comportamiento del porcentaje de incidencia de Nectria con respecto a la precipitación fue el mismo que se obtuvo para esta variable en el primer análisis ya que los proyectos con los mayores porcentajes de Nectria se agruparon en el menor rango de precipitación (2392-2792 mm), mientras que, en los rangos de mayor precipitación (3192-3592 mm) solo se ubicaron proyectos con bajos porcentajes.

Con respecto a la variable de radiación solar ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{anual}$) la cantidad de proyectos con incidencia de 0 - 5 % disminuyen conforme aumenta el rango de la radiación solar. Además, en el último rango de radiación ($24,82 - 27,32 \text{ MJ}/\text{m}^2$) no hubo incidencia de radiación mayor al 5 % y en el tercer rango de radiación ($22,32 - 24,82 \text{ MJ}/\text{m}^2$) no hubo incidencia mayor al 10 %.

Para la variable de acidez, se obtuvo que en todas las categorías de acidez la mayor cantidad de proyectos tienen una incidencia entre 0 y 5 %. Sin embargo, contrario a lo esperado los proyectos con porcentajes de acidez más severos (40– 45 %) se ubican en la categoría más baja de acidez.

Para la variable CICE, la mayoría de los proyectos con menores porcentajes de incidencia se agruparon en la categoría 2 de CICE (5-25 cmol/L), sin embargo en esa misma clase también se ubicaron proyectos con valores de 40-45% de incidencia.

Análisis de Datos en R

El análisis del algoritmo de clasificación *tree* dio como resultado el siguiente árbol de predicción.

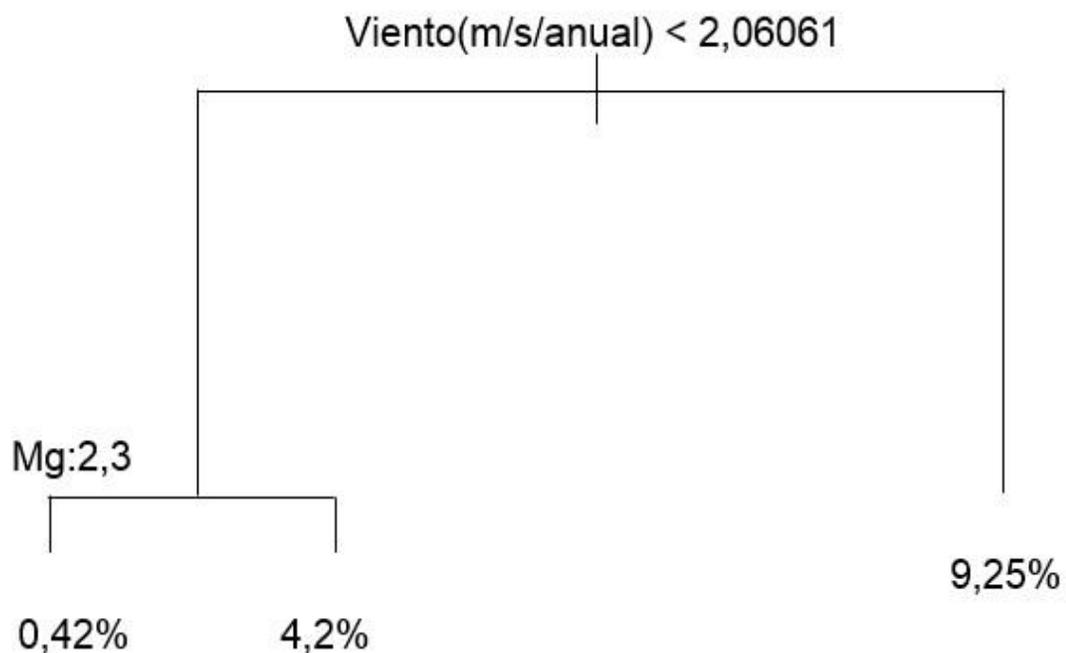


Figura 13. Árbol de predicción del porcentaje de incidencia de la Nectria del algoritmo Tree.

En la figura 13 se observa que el algoritmo escogió como variables predictoras el Viento (m/s/año), la cual para las pruebas de contingencia y gráficos no resultó relevante y Mg que si resultó significativa en las pruebas anteriores. Según el árbol si una plantación se caracteriza con vientos menores a 2,06061 (m/s), con Mg de la categoría 2 o 3, el porcentaje de incidencia será alrededor de 0,4167 y si presenta Mg de categoría 3 el porcentaje será del 4,2%. Mientras que, si la plantación presenta velocidades de viento anuales mayor a 2,06061(m/s), el porcentaje de incidencia alcanzará 9,25 %. El viento se encuentra entre uno de los factores limitantes el óptimo desarrollo de la melina por lo que podría dejarla susceptible a enfermedades como Nectria (Rojas, et al, 2004).

El algoritmo de *Random forest* realizó un total de 500 árboles de clasificación en donde las variables predictoras más influyentes fueron la radiación solar (MJ/m²/año), pH en agua, CICE, P, Ca y Mg.

La regresión múltiple que utilizó todas las variables predictoras dio como resultado un r² de 0,58, además utilizando este modelo ninguna variable resultó significativa. Por otra parte, la regresión múltiple utilizando el método de *step backwards* disminuyó el r²a 0,52 pero este si encontró variables predictoras significativas.

El valor-p de la regresión con el método de *step backwards* no resultó significativo (0,21), lo cual se puede justificar por el tamaño reducido de la muestra y la cantidad de variables categóricas (variables edáficas) utilizadas en el modelo.

A pesar del r² y el valor-p, el porcentaje de sesgo dio como resultado -16 %. Los resultados de la regresión múltiple con el método de *step backwards* se muestran el cuadro 10 y el modelo se muestra en la ecuación 2.

Cuadro 10. Coeficientes de la regresión con el método step backwards en R.

Variable	Estimado	Std. Error	t valor	Pr(> t)	Significancia
Intercepto	-8,39E+00	2,87E+00	-2,925	0,00741	**
Precipitación	4,13E-03	1,33E-03	3,104	0,00484	**
Radiación solar	4,91E-01	1,55E-01	3,162	0,00421	**
Humedad relativa	-4,00E+01	1,32E+01	-3,03	0,00578	**
Temperatura	7,78E-01	2,53E-01	3,078	0,00515	**
Evapotranspiración	3,12E-04	2,13E-04	1,465	0,15591	
Acidez2	-2,65E-01	7,85E-02	-3,374	0,00251	**
Acidez3	-2,38E-01	7,53E-02	-3,16	0,00423	**
Mg2	-2,55E-01	8,31E-02	-3,069	0,00527	**
Mg3	-2,46E-01	8,07E-02	-3,045	0,00557	**
K2	4,68E-01	1,50E-01	3,121	0,00464	**
K3	5,20E-01	1,56E-01	3,338	0,00274	**
CICE2	4,71E-01	1,58E-01	2,981	0,00649	**
CICE3	3,49E-01	1,33E-01	2,621	0,01498	*
Sa2	9,39E-02	1,12E-01	0,838	0,41052	
Sa3	-1,34E-01	1,18E-01	-1,139	0,26579	
Zn2	-7,13E-03	9,21E-02	-0,077	0,93894	
Zn3	-1,65E-01	1,11E-01	-1,484	0,15083	
Fe2	1,51E-01	5,83E-02	2,582	0,01635	*

Códigos de significancia: 0 '****' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1

$$y = -8,390 + 0,004133P + 0,4906R - 39,99H + 0,7775T + 0,0003115E - 0,2647A2 - 0,2381A3 - 0,2551M2 - 0,2458M3 + 0,4681K2 + 0,5197K3 + 0,4706C2 + 0,3491C3 + 0,09387S2 - 0,1342S3 - 0,007126Z2 - 0,1646Z3 + 0,1505F2$$

(2)

Donde:

P= Precipitación (mm/añual)	K2= Rango 2 de K
R = Radiación solar (MJ/m ² /añual)	K3= Rango 3 de K
T= Temperatura (°C/añual)	C2= Rango 2 de CICE
E = Evapotranspiración (mm/añual)	C3= Rango 2 de CICE
H= Humedad relativa (fracción/añual)	S2= Rango 2 de SA
A2= Rango 2 de Acidez (%)	S3= Rango 2 de SA
A3= Rango 3 de Acidez (%)	Z2=Rango 2 de Zn
M2= Rango 2 de Mg	Z3= Rango 3 de Zn
M3= Rango 3 de Mg	F2= Rango 2 de Fe

Cabe destacar que las variables de Zn, Fe, y Sa aparecen por primera vez como relevantes, además según el cuadro 16 estas no tienen ningún valor de significancia, sin embargo, al sacarlas el r^2 disminuyó a 0,32 por lo que las variables si resultaron influyentes y se decidió incluirlas.

En el cuadro 10 se comparan las variables elegidas como relevantes para cada método utilizado para relacionar el porcentaje de incidencia con las variables de suelo, clima y manejo.

Cuadro 11. Variables predictoras elegidas como relevantes para preceder el porcentaje de la Nectria para cada método de correlación utilizado.

	Tablas de contingencia	Tendencia	Tree	Random Forest	Regresión
Calidad de Manejo		x			
pH en Agua				x	
Mg	x		x	x	x
CICE	x			x	x
P	x			x	
Ca	x			x	x
Precipitación	x			x	x
Radiación solar	x			x	x
Humedad relativa					x
Temperatura					x
Acidez	x				x
k		x			x
Viento			x		
Evapotranspiración					x
SA					x
Zn					x
Fe					x

Para el análisis usando como variable dependiente el porcentaje de incidencia de la Nectria, las variables Mg, CICE, precipitación, radiación solar fueron las que más coincidieron con los métodos de análisis, además las mismas también resultaron relevantes para el análisis usando como variable dependiente la presencia de la Nectria. Por otra parte, también hubo variables que solo resultaron importantes para uno o dos métodos como lo es el caso de viento, SA, Zn y Fe que solo aparecen para el método de regresión con *step backwards*.

A continuación, en la figura 14 se muestra el mapa construido a partir del modelo presentado en la ecuación 2.

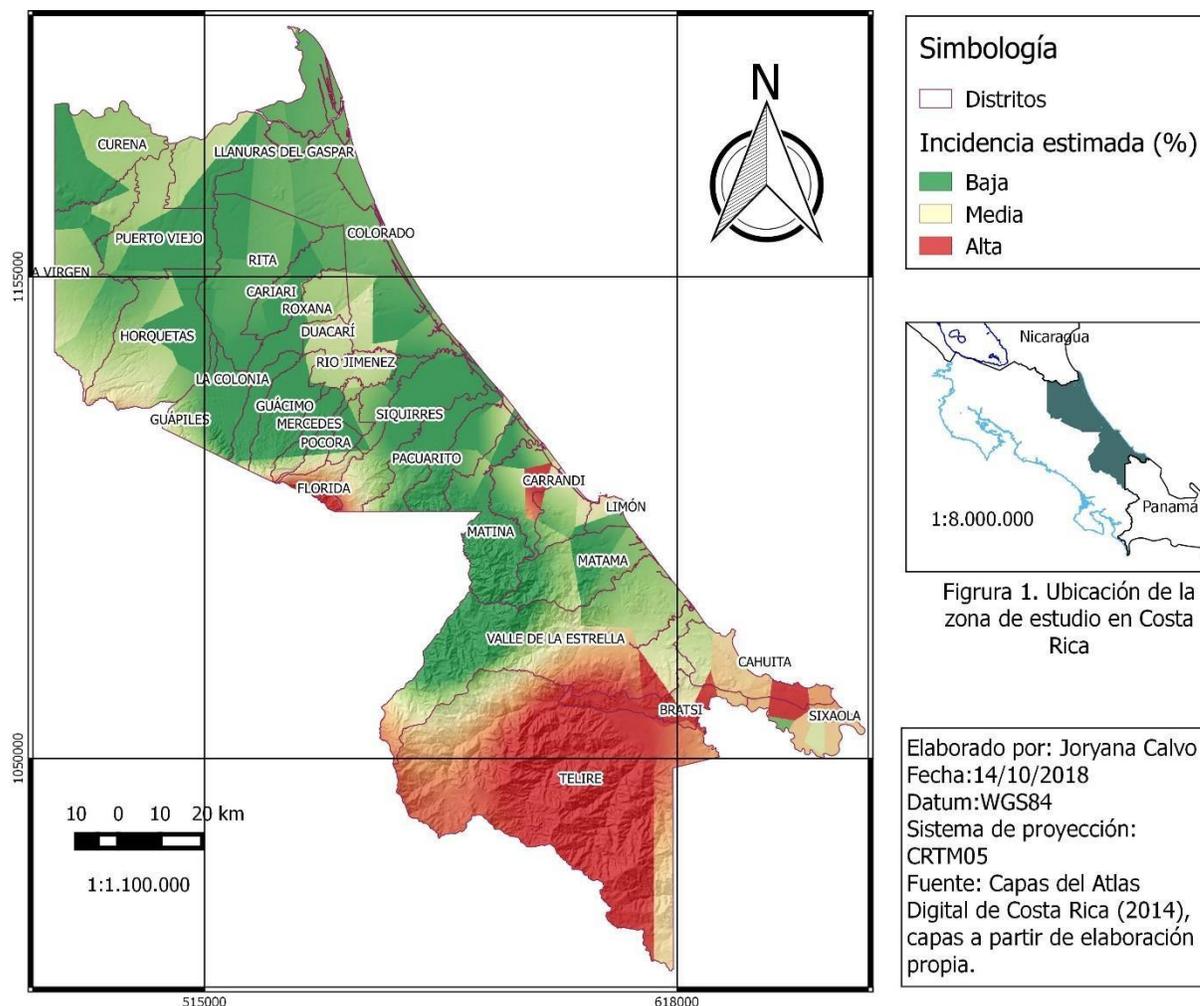


Figura 14. Vulnerabilidad ante el porcentaje de incidencia de la Nectria para la zona de estudio.

Según se observa en la figura 14, Telire es una de las zonas más afectadas ya que solo se visualizan tonalidades rojizas indicando una incidencia estimada muy alta. Telire presenta valores dentro de la categoría 3 en la mayoría de su área, por lo tanto, corresponden a suelos muy ácidos los cuales son incompatibles con los requerimientos de la melina. Además, la presencia de alta acidez en el suelo provoca

la disminución de la disponibilidad de calcio, magnesio y fósforo, las cuales son variables edáficas que la melina requiere para su óptimo desarrollo (Martínez, 2015).

Otra variable limitante para la zona sur fue el porcentaje de saturación de acidez, ya que toda esta zona presentó valores mayores a 50% cuando lo recomendado es de valores menores de 3% (Martínez, 2015).

En las zonas de Carrandí y la Florida, la variable edáfica que resultó más limitante fue Mg, ya que los suelos solo presentan Mg de la categoría 1 (<1 cmol/L) cuando lo recomendado es que los suelos dispongan >6cmol/L (Martínez, 2015).

En la mayoría de la zona de estudio se observa coloraciones verdes, sin embargo, el porcentaje de sesgo da como resultado un valor de -16% lo que indica que el modelo está subestimando los valores.

Conclusiones

Se contabilizaron 72 expedientes con proyectos de PSA de reforestación con melina para el periodo de (2010-2017), de los cuales 39 reportaron el ataque de la Nectria, correspondiente al 54%. La información obtenida de la revisión de los expedientes sirvió para conocer el estado de los proyectos de melina, sin embargo, en la mayoría de los casos la información fitosanitaria y de manejo fue limitada y desactualizada.

De las visitas realizadas campo, 4 proyectos que decían no tener Nectria en sus informes de regencia, la enfermedad si se comprobó en campo. Sin embargo, 2 de los proyectos se establecieron en el 2012 y 1 en el 2013 por lo que el periodo de seguimiento por parte del regente (5 años) ya había terminado para la fecha en la cual se hicieron las visitas, por lo que existe la posibilidad de que la finca todavía no presentara síntomas de la Nectria cuando se hizo la última visita de regencia.

Se rechaza la hipótesis nula planteada para este estudio, ya que las tablas de contingencia, los algoritmos *Tree*, *Random Forest* y la regresión demostraron que si

existe relación entre la presencia y el porcentaje de incidencia de la Nectria con las variables de suelo, clima y manejo.

Comparando los 4 métodos utilizados (tablas de contingencia, algoritmo *Tree*, algoritmo *Random Forest* y regresión) las variables edáficas que resultaron más relevantes fueron magnesio y calcio en donde estas se relacionan inversamente proporcional a la presencia e incidencia de la Nectria, mientras que, la variable climática que resulta más relevante es la radiación solar la cual presenta una tendencia inversamente proporcional a la presencia e incidencia de la Nectria. A pesar de que la variable de manejo no se colocó entre las variables más relevantes, en las visitas de campo y en los gráficos de tendencia se observó que la afectación de la Nectria se intensifica entre más deficiente sean las actividades silviculturales la plantación.

El valor-p de la regresión es de 0,21 y el r^2 es 0,52, debido al tamaño de la muestra y a las variables edáficas que fueron de tipo categóricas, sin embargo, dentro del modelo si hubo variables significativas.

A pesar de la información limitada de los expedientes y de las variables, el mapa de vulnerabilidad si se logró construir y con valor del sesgo del -16 %, lo cual es buen comienzo para identificar las zonas más susceptibles al ataque de Nectria.

El mapa de vulnerabilidad indica que el sur de la zona de estudio es la más propensa a sufrir altos porcentajes de incidencia de la Nectria.

Recomendaciones

Con respecto a la información contenida en los expedientes, se insta a los regentes a brindar más detalles sobre el manejo u otras observaciones relevantes en los informes de regencias, para así facilitar estudios como este en el futuro, ya que en algunas ocasiones durante la fase de revisión de expedientes la información se presentó de manera muy escueta. Además, se recomienda hacer una evaluación más profunda

conjunto al propietario para definir las especies a reforestar, tomando en cuenta los requerimientos de estas.

Se recomienda considerar las zonas más propensas a tener altos porcentajes de incidencia al momento de seleccionar melina para reforestar, ya que varios proyectos con esta especie se ubican en las zonas de alto riesgo de acuerdo con el mapa de vulnerabilidad obtenido en este estudio.

En el caso de que se haya decidido reforestar con melina, se debe considerar las variables que más se correlacionan con la enfermedad y así brindar un mejor manejo a la plantación, ya que además de las condiciones climáticas y edáficas, la calidad del manejo influye considerablemente en el estado de la plantación.

Durante la realización de este trabajo se notó la deficiencia en el abastecimiento y disponibilidad de datos de clima y suelo para el país, por lo que se recomienda la elaboración de estudios donde se recolecten este tipo de información. Además, con una especie tan ampliamente plantada como lo es la melina en el país, se debería tener reportadas las cantidades exactas de las variables edáficas que requiera la melina para así saber qué y cuánto fertilizar y cuales suelos son los mejores para reforestar con esa especie.

Referencias

- Acevedo, Y. (2013). *Taxonomía molecular de aislamientos de fusarium obtenidos a partir de muestras clínicas* (Máster). Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, p.12.
- Agrios, G. (2005). *Plant pathology* (5^{ta} ed.). Montecillo, MX, LIMUSA, p. 830-390.
- Alfaro, M., & De Camino, R. (2002). Melina (*Gmelina arborea*) in Central America. Editado por M. Varmola, p. 1-2. Recuperado de <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/006/y7206e/y7206e00.pdf>.
- Arguedas, M. (2004). Problemas fitosanitarios de la melina (*Gmelina arborea* (Roxb)) en Costa Rica (en línea). KURÚ: Revista Forestal (Costa Rica) 1(2), p. 7-8. Recuperado de <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/574>.
- Arguedas, M., Rodriguez-Solis, M., Moya, R., & Berrocal, A. (2018). *Gmelina arborea* «death disease» in fast-growth plantations: Effects of soil and climatic conditions on severity and incidence and its implications for wood quality. *Forest Systems*, 27(1), p. 1-8. <https://doi.org/10.5424/fs/2018271-12236>.
- Ávila, M & Betancourt, M. (2014). *Evaluación de la variabilidad de la estructura anatómica de Schizolobium parahybum Bell Blake y Gmelina arborea Roxb., en árboles con diferentes tratamientos de fertilización, al cuarto año de plantados en la provincia de Zamora Chinchipe*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional de Loja, p. 8-10.
- Barrantes, G. (2000). Aplicación de incentivos a la conservación de la biodiversidad en Costa Rica, p. 6-7. Recuperado de http://www.fbs.go.cr/sites/default/files/biblioteca/biodiversidad_psa_estudio_caso_cr.pdf.

- Consejo Forestal (ACAHN) (2015). Taller de intercambio de experiencias de manejo y control de *Nectria* sp. por productores forestales en la región Huetar Norte de Costa Rica, p. 4-7. Recuperado de https://issuu.com/clurforestal/docs/taller_nectria_sp.
- Cribián, D. (2013). *Manual para la identificación y manejo de plagas en plantaciones forestales comerciales* (1era ed.): p. 34-35. Michoacán, México: Universidad Autónoma Chapingo. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114771/Libro -
Manual para la identificación y manejo de plagas en plantaciones forestales comerciales.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114771/Libro_-_Manual_para_la_identificacion_y_manejo_de_plagas_en_plantaciones_forestales_comerciales.pdf).
- Dunker, D., Plischke, M., Leffondre, K., & Heinze, G. (2014). Augmented backward elimination: A pragmatic and purposeful way to develop statistical models. *PLoS ONE*, 9(11), 2-3. Recuperado de <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0113677&type=printable>.
- FONAFIFO. (2016). Informe de rendición de cuentas FONAFIFO, p. 5. Recuperado de http://www.fonafifo.go.cr/quienesomos/rendicion/RC2016/4-INF_PPSA.pdf.
- FONAFIFO. (2017). Informe de rendición de cuentas FONAFIFO, p. 13. Recuperado de http://www.fonafifo.go.cr/quienesomos/rendicion/RC2017/P_JM.pdf.
- Frankel, S.; Juzwik, J.; Koch, F. (octubre, 2012). Enfermedades de árboles forestales y cambio climático. Departamento de Agricultura, Servicio Forestal, Centro de Recursos del Cambio Climático. www.fs.usda.gov/ccrc/temas/enfermedades-forestales

- Gonzales, G., & Serrano, J. R. (2004). Propiedades y utilidades de la madera de Melina (*Gmelina arborea* (Roxb)) procedente de árboles plantados en costa rica (en línea) Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 1(1), p. 1-2-6. Recuperado de <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/598/523>.
- INEC. (2014). IV censo nacional agropecuario, p. 1. Recuperado de <http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documentos/agropecuario/publicaciones/reagropeccenagro2014-005.pdf>.
- InfoAgro. (2007). Plan Sectorial Regional Agropecuario, p4. Recuperado de http://www.infoagro.go.cr/MarcoInstitucional/Documents/PRDA_HAtlantica.pdf
- Lawrence, B. (2018). Decision Trees—Pruning. Recuperado de <https://towardsdatascience.com/decision-trees-pruning-4241cc266fef>.
- Lega, F (1988). *Estudio de la Forma de Gmelina arborea Roxb. Análisis de las plantaciones de Manila, Siquirres*. (Tesis de Mg.Sc). Universidad de Costa Rica y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), p. 98.
- Leyes y Decretos. (2015). Asamblea Legislativa. Decreto N° 39058- MAG. Costa Rica.
- Leyes y Decretos. (1996). Asamblea Legislativa. Ley Forestal N°7575. Costa Rica.
- Lugo, J. D. (2016). Suelos aluviales, p. 1. Recuperado de <https://prezi.com/e8xsollekmlu/suelos-aluviales/>.
- Martínez, H. (2015). Melina (*Gmelina arborea* Roxb.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”, p. 4. Recuperado de <https://www.onfcr.org/media/uploads/documents/melina.pdf>.
- Méndez, A. (2011). *Evaluación de tratamientos para el manejo de nectria sp. En plantaciones de Gmelina arborea en Santa Rosa de Pocosal, Alajuela* (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, p. 35.

- Mendez, J. C., & Bertsch, F. (2012). *Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de costa rica* (1st ed.). San José: ACCS, p.14-15.
- Mendoza, J. B. (2018). Arboles de decisión con R – clasificación, p. 1. Recuperado de https://rpubs.com/jboscomendoza/arboles_decision_clasificacion
- Moya, R. 2000. Evaluación de las características y propiedades tecnológicas para la Melina (*Gmelina arborea*) provenientes de plantaciones forestales: Aspectos importantes sobre la trabajabilidad de la madera de Melina (*Gmelina arborea*) ITCR. Cartago, CR, p. 120.
- Muñoz, F. d. M. (1998). *Propiedades y usos de las maderas de Jaúl y Melina* (1era ed.). San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, p. 15.
- Moya, R. (2004). *Gmelina arborea* en Costa Rica, p. 49-50. Recuperado de <http://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/download/20248/20007>.
- Oficina Nacional Forestal (ONF). (2016). Usos y aportes de la madera en costa rica, estadísticas 2016, p. 12. Recuperado de https://issuu.com/oficinanacionalforestalcostarica/docs/informe_onf_final-alta.
- Oficina Nacional Forestal (ONF). (2018). Programa de pago por servicios ambientales, p. 1. Recuperado de <https://www.onfcr.org/article/psa/>.
- Ortiz, E. (2014). Atlas de Costa Rica 2014. Cartago, Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Disco compacto.
- Porras, A. (2015). Random forest vs simple tree, p. 1. Recuperado de <https://quantdare.com/random-forest-vs-simple-tree/>.

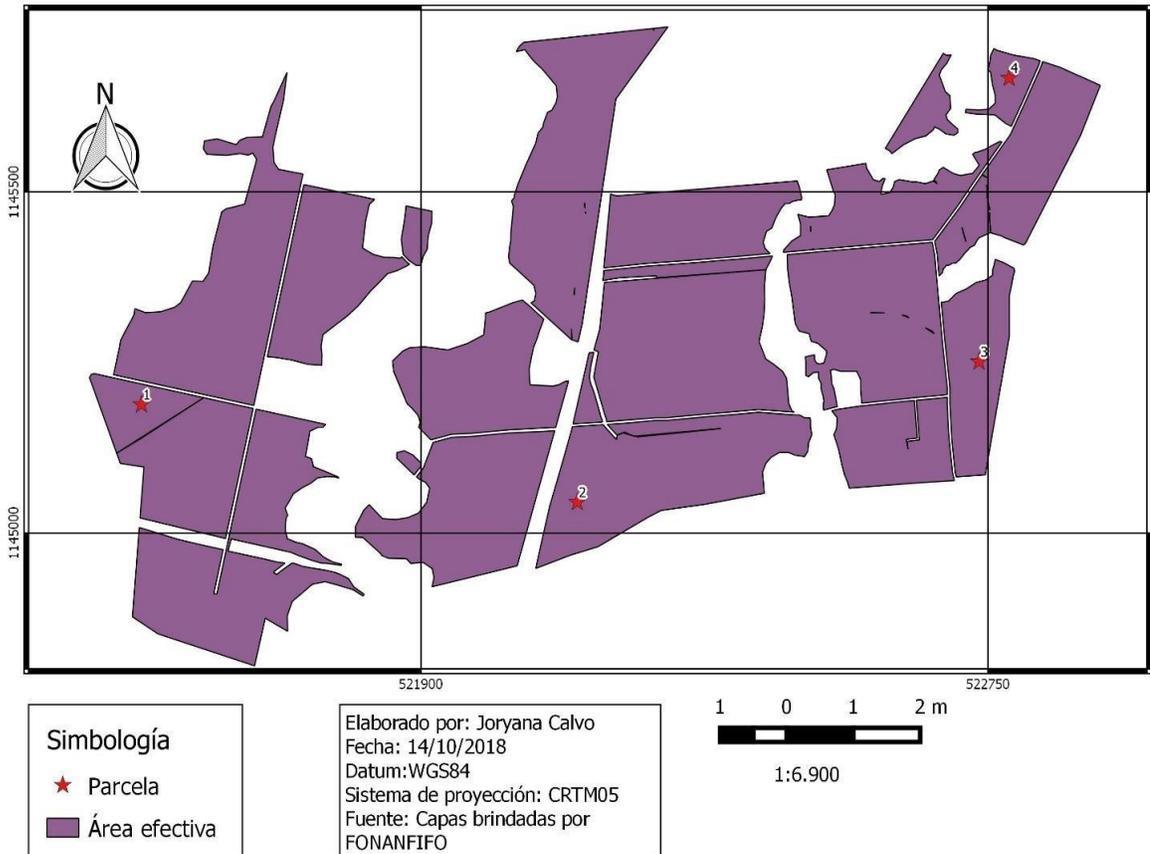
- Rodríguez, J. (2002). El éxito forestal en Costa Rica en 5 casos, p. 1-3. Recuperado de http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Bosques/MINAET_2002_xitoforestal.pdf
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O. & Arguedas, M. (2004). Manual para productores de Melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica, p. 132-156. Recuperado de http://www.sirefor.go.cr/Documentos/Especies_plantaciones/MELINA/Manual%20para%20los%20productores%20de%20melina.pdf.
- Salas, R. (2012). *Evaluación de un ensayo Genético de Gmelina arborea en Siquirres, Limón* (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, p. 25-26.
- Salcedo, C. Estimación de la Ocurrencia de incidencias en declaraciones de pólizas de declaración. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, p. 1-3. Recuperado de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/Salcedo_pc/enPDF/.
- Saha, S., S. Moorthi, H. Pan, X. Wu, J. Wang, et al (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bulletin of the American Meteorological Society. Recuperado de <https://globalweather.tamu.edu/>.
- Sánchez, O., & Navarrete, G. (2017). La experiencia de Costa Rica en el pago por servicios ambientales: 20 años de lecciones aprendidas. Revista De Ciencias Ambientales, 51(2), 201. Recuperado de <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/9487/11254>.
- SIREFOR. (2013). Tipos de bosque del inventario nacional forestal, p.1. Recuperado de http://www.sirefor.go.cr/?page_id=1053.
- SIREFOR. (2015). Reporte estadístico forestal 2014-2015, p. 17. Recuperado de http://www.sirefor.go.cr/?wpfb_dl=15.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate,
p.89. Recuperado de
[http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-
GeogrRev.pdf](http://www.unc.edu/courses/2007fall/geog/801/001/www/ET/Thornthwaite48-GeogrRev.pdf).

Anexos

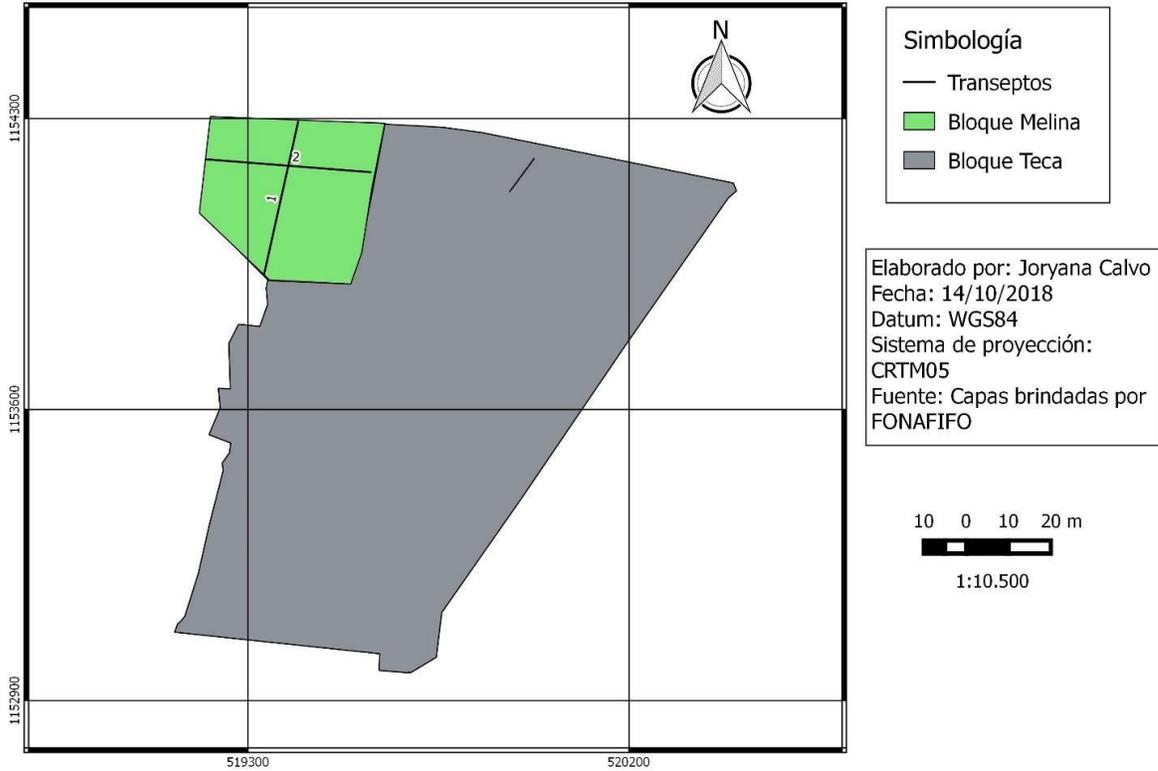
Anexo 1. Diseño de muestreo del proyecto de PSA CN-01-20-309-2014 para la evaluación de la Nectria en campo.

Distribución de las parcelas de muestreo del proyecto CN-01-20-0309-2014



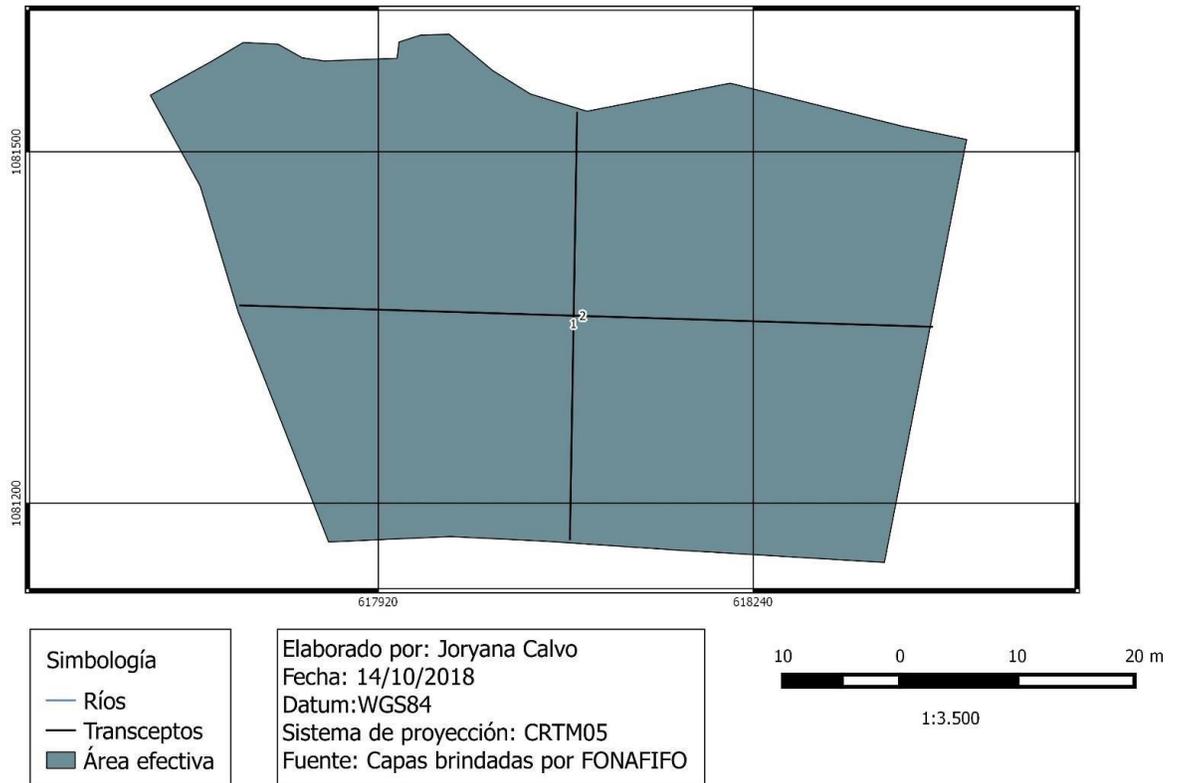
Anexo 2. Diseño de muestreo del proyecto de PSA PO-01-20-0135-2012 para la evaluación de la Nectria en campo.

Recorrido de evaluación de la Nectria en el proyecto PO-01-20-0135-2012



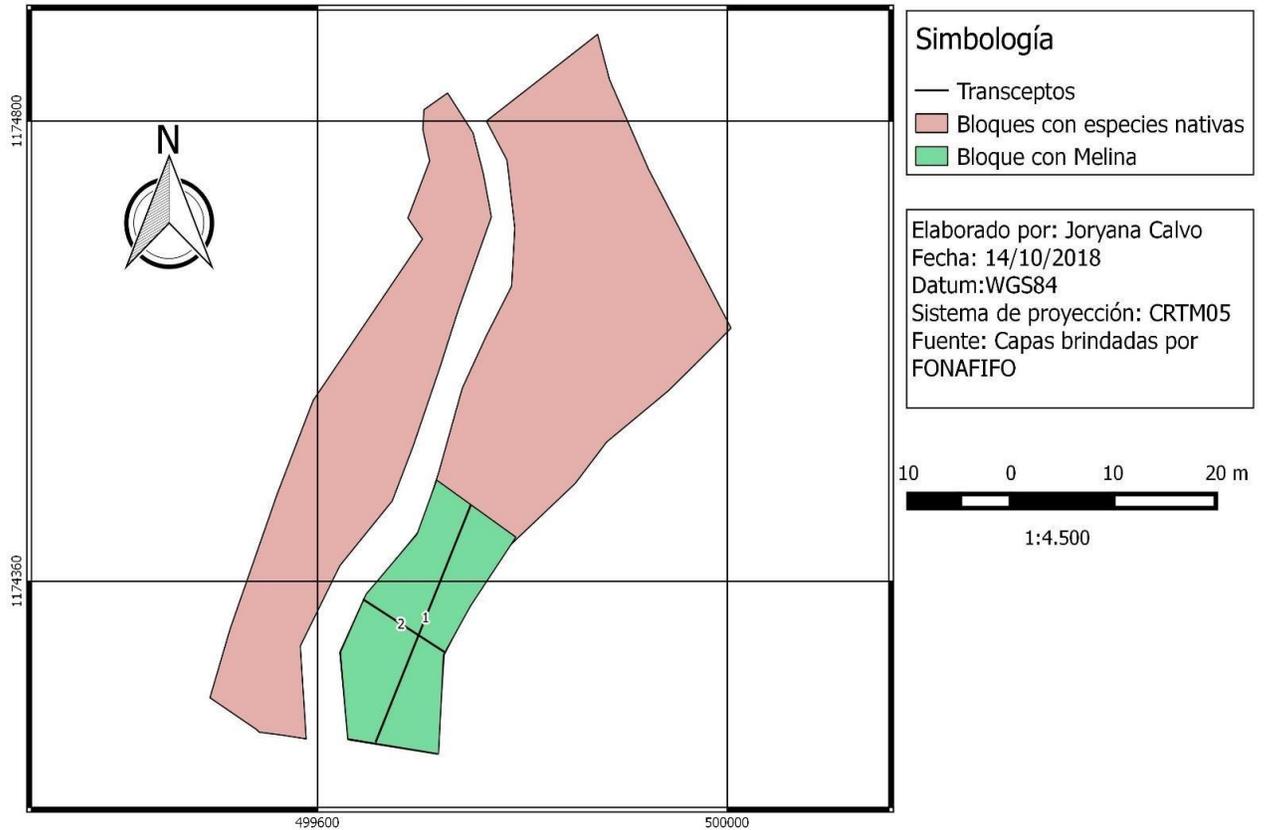
Anexo 3. Diseño de muestreo del proyecto de PSA LM-01-20-0191-2011 para la evaluación de la Nectria en campo.

Recorrido de la evaluación de la Nectria en el proyecto LM-01-20-0191-2011



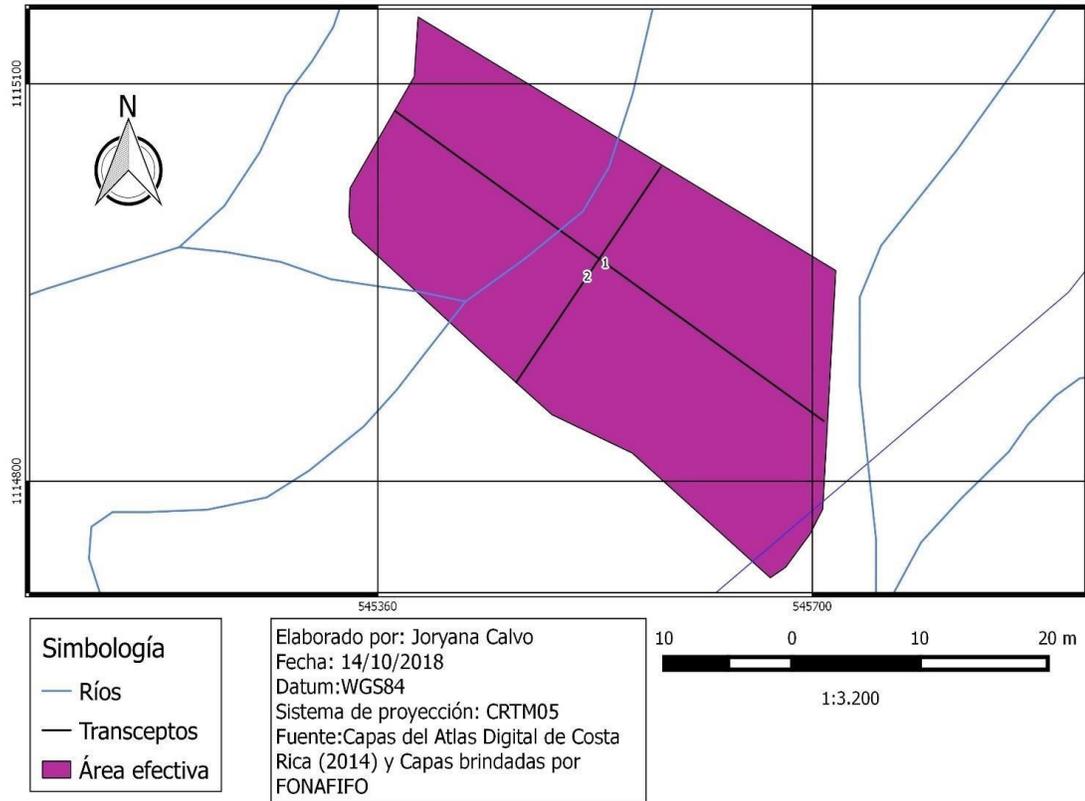
Anexo 4. Diseño de muestreo del proyecto de PSA SA-01-20-0133-2012 para la evaluación de la Nectria en campo.

**Recorrido de la evaluación de la Nectria en el proyecto
SA-01-20-0133-2012**



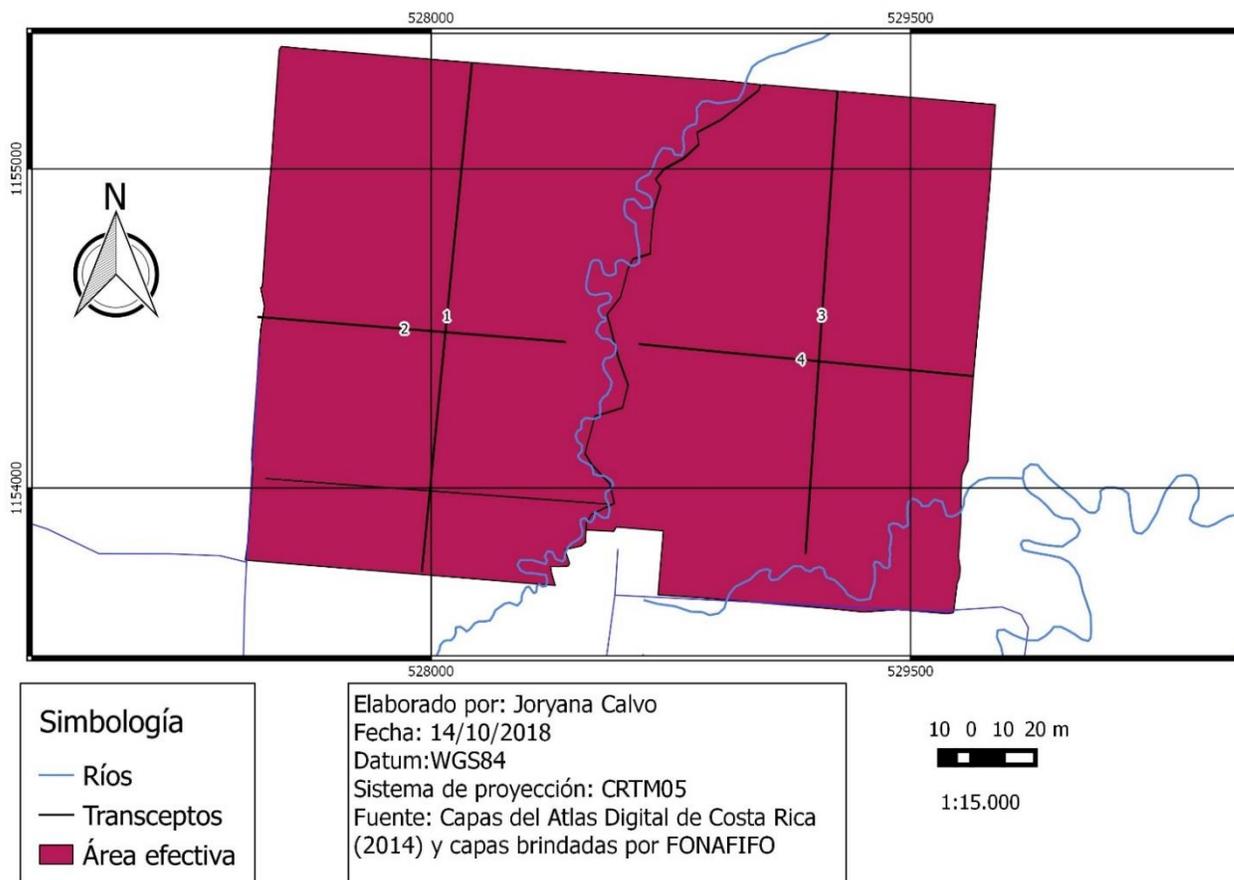
Anexo 5. Diseño de muestreo del proyecto de PSA LM-01-20-0144-2012 para la evaluación de la Nectria en campo.

Recorrido de la evaluación de la Nectria en el proyecto LM-01-20-0144-2012



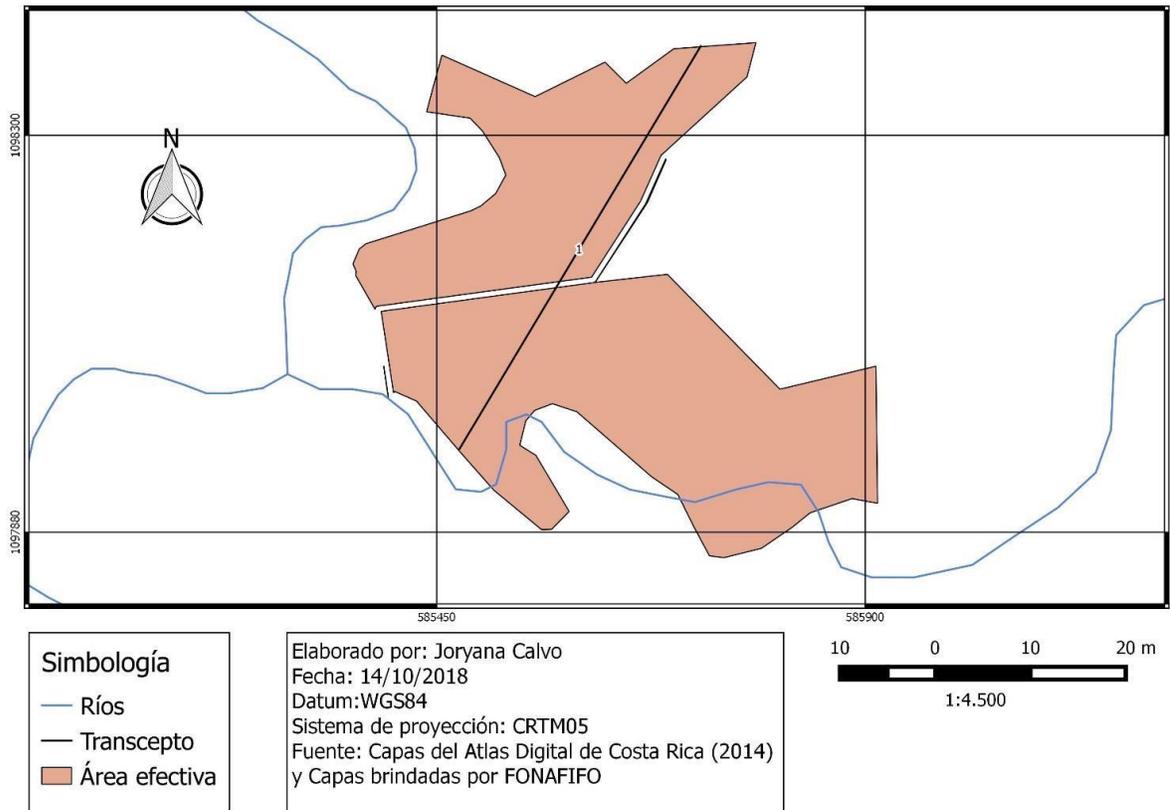
Anexo 6. Diseño de muestreo del proyecto de PSA CN-01-20-0186-2012 para la evaluación de la Nectria en campo.

Recorrido de la evaluación de la Nectria en el proyecto CN-01-20-0186-2012



Anexo 7. Diseño de muestreo del proyecto de PSA LM-01-20-0031-2013 para la evaluación de la Nectria en campo.

Recorrido de la evaluación de la Nectria en el proyecto LM-01-20-0031-2013



Anexo 8. Código de R para la realización de los árboles de clasificación y predicción

Importación de base de datos desde excel

```
dataset = read_xlsx(path = 'Datos.xlsx') View('Datos.xlsx') head(dataset)
```

Algoritmos utilizados

```
library(readxl) library(randomForest) library(tree) library(party)
```

Definir tipo de variables

```
dataset$ClasificacióndeManejo = factor(dataset$Clasificación de Manejo) dataset$Mg = factor(dataset$Mg) dataset$Ca = factor(dataset$Ca) dataset$PH_H20 = factor(dataset$PH_H20) dataset$CICE = factor(dataset$CICE) dataset$Acidez = factor(dataset$Acidez) dataset$K = factor(dataset$K) dataset$P = factor(dataset$P) dataset$ZN = factor(dataset$ZN) dataset$Cu = factor(dataset$Cu) dataset$Fe = factor(dataset$Fe) dataset$Mn = factor(dataset$Mn) dataset$SA = factor(dataset$SA)
```

Tree

```
tree.dataset = tree(Incidencia.regente~., data = dataset) tree.pred = predict(object = tree.dataset, newdata = dataset) table(tree.pred, dataset$Incidencia.regente) plot(tree.dataset) text(tree.dataset) summary(tree.dataset)
```

Con validacion cruzada para mejorar el error de clasificacion

```
set.seed(1) cv.d = cv.tree(tree.dataset, FUN = prune.tree) prune.d = prune.tree(tree.dataset, best=3) plot(prune.d) text(prune.d, pretty = 0)
```

RandomForest

```
rf.dataset = randomForest(Incidencia.regente~., data = dataset, mtry =4, importance=TRUE) summary(rf.dataset) rf.pred = predict(object = rf.dataset, newdata = dataset, replace=TRUE) table(tree.pred, dataset$Incidencia.regente)
```

Importancia de las variables

```
importance(rf.dataset) varImpPlot(rf.dataset) print(rf.dataset) plot(rf.dataset)
```

Anexo 9. Código de R para la realización de la regresión múltiple.

Importación de base de datos desde excel

```
dataset = read_xlsx(path = 'Datos.xlsx') View('Datos.xlsx') head(dataset)
```

Algoritmos utilizados

```
library(readxl) library(ggplot2) library(GGally) library(knitr) library(xtable) dataset = read_xlsx(path = 'Datos.xlsx') View('Datos.xlsx') head(dataset)
```

Definición de tipo de Variables

```
dataset$ClasificacióndeManejo = factor(dataset$Clasificación de Manejo) dataset$Mg = factor(dataset$Mg) dataset$Ca = factor(dataset$Ca) dataset$PHH20 = factor(dataset$PH_H20) dataset$CICE = factor(dataset$CICE) dataset$Acidez = factor(dataset$Acidez) dataset$K = factor(dataset$K) dataset$P = factor(dataset$P) dataset$ZN = factor(dataset$ZN) dataset$Cu = factor(dataset$Cu) dataset$Fe = factor(dataset$Fe) dataset$Mn = factor(dataset$Mn) dataset$SA = factor(dataset$SA) dataset = data.frame(dataset)
```

Regresión múltiple

```
m2 <- lm(Incidencia.regente~., data = dataset) m2 summary(m2)
```

Regresión múltiple con step backwards

```
step(m2,direction = "backward") m3<-lm(formula = Incidencia.regente ~ Precipitacion..mm.anual. + Solar.... + Hrelative.... + T..C. + EVPT..mm.anual. + Acidez + Mg + K + CICE+SA +ZN+ Fe, data = dataset) summary(m3) plot(m3,which=1:6)
```