

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Estimación De Turnos Para Cedro Rojo (*Cedrela odorata* L.) En Plantaciones De Enriquecimiento De Acahual A 25 Años De Establecidas En Pochutla, Oaxaca

Por:

**VICTOR MANUEL LIRA MORENO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Estimación De Turnos Para Cedro Rojo (*Cedrela odorata* L.) En Plantaciones De Enriquecimiento De Acahual A 25 Años De Establecidas En Pochutla, Oaxaca

Por:

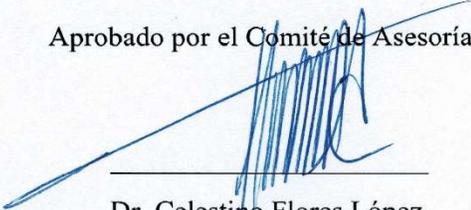
**VICTOR MANUEL LIRA MORENO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

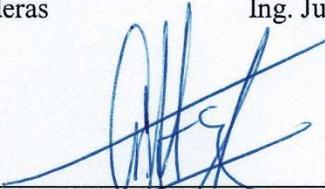
**INGENIERO FORESTAL**

Aprobado por el Comité de Asesoría:

  
Dr. Celestino Flores López  
Asesor Principal

  
M.C. José Aniseto Díaz Balderas  
Coasesor

  
Ing. Juan Morales Hernández  
Coasesor

  
Dr. José Antonio González Fuentes  
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2022

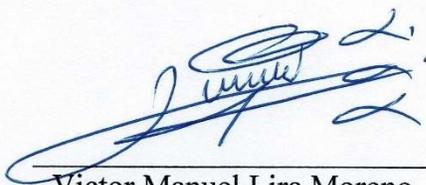


## DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en el plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamiento de un autor sin usarlo; utilizar material digital, como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas, o datos sin citarla autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento que de cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición, o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Victor Manuel Lira Moreno', written over a horizontal line.

Victor Manuel Lira Moreno

El presente trabajo de tesis ha sido financiado y apoyado por el Proyecto de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro como clave No. 38111-425103001-2175. Que lleva por nombre “Diversidad y estructura de bosques tropicales en el occidente y sureste de México”. Proyecto que está a cargo de Dr. Celestino Flores López Profesor-Investigador del Departamento Forestal.

## DEDICATORIA

A Dios por permitirme estar en este mundo y darme una gran familia.

A mis padres Silvia Moreno Vélez y Victor Lira Flores por su amor incondicional, motivación y apoyo durante este proceso académico, por sus pláticas, consejos y momentos especiales, además de darme todo, haciendo lo imposible posible. Muchas gracias papá y mamá.

A mis hermanas Ing. Gilda Lira Moreno y Ing. Amacalli Lira Moreno, por su confianza, apoyo y motivación ya que son mi ejemplo a seguir adelante. Muchas gracias hermanas.

A mi sobrina Aylen Victoria Lira Moreno, por llegar a mi vida y darme la oportunidad de vivir momentos inolvidables junto a ti.

A mis abuelos gracias por todos esos momentos especiales que pude estar con ellos.

Catalina Flores Juárez (†)

Luis Lira de Ramón (†).

Elodia Vélez Hernández (†)

Tomás Moreno Machorro (†)

## AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por darme una gran oportunidad de formarme profesionalmente y obtener conocimientos dentro y fuera de la institución.

Al Departamento Forestal y cada uno de los Profesores Investigadores que lo conforman, gracias por compartir su conocimiento y experiencias.

Al Dr. Celestino Flores López, por su confianza para poder llevar a cabo el presente estudio, además de su disponibilidad para asesorías, al igual que compartir anécdotas, experiencias y sobre todo ser el ejemplo a seguir como profesional, además de ser un profesor investigador de calidad y contagiar esa pasión de ser Forestal.

Al M.C. José Aniseto Días Balderas por su confianza, amistad, cátedras y consejos que me brindó durante la carrera, además de ser un profesor investigador de calidad y formar parte de este estudio y sus aportaciones al mismo.

Al Ing. Juan Morales Hernández, por permitir poder llevar a cabo el presente estudio, además del aporte de sus conocimientos y más que nada parte de su experiencia.

Al Dr. Jorge Méndez González, al Dr. Genaro Esteban García Mosqueda, al Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo e Ing. Jil Cabrera por sus pláticas, su apoyo durante este proceso académico.

Gracias a mis amigos por todos aquellos momentos buenos y difíciles durante el proceso de la carrera: Ing. Marco Antonio Vera Méndez, Ing. José Gil Solís Ruiz, Ing. Roberto Carlos Vázquez García, Ing. Eric Berteli Santizo Morales, Ing. Adriana Gutierrez Angeles, Ing. Amador Silverio Martínez Reyes y Atahualpa Yupanqui Magdaleno López, gracias por su confianza. Y a cada uno de los compañeros de generación CXXXII.

Gracias a Zaira Yamel Llanes García, Itzel Valladares Herrera, Noé Ramírez López, por su amistad, confianza y compañerismo, además de agradecer por el apoyo de levantamiento de datos en campo en Pochutla, Oaxaca.

A el C. Leobardo Ambrosio Valencia, C. Paulino Ambrosio Ambrosio y al M.C. Carlos Aldair Contreras Cruz, por el apoyo en el levantamiento de datos en las plantaciones de Pochutla, Oaxaca.

A Paulina Cruz Navarro futura ingeniera, por tu confianza y apoyo incondicional al igual que siempre estas al pendiente de mí, mil gracias por llegar a mi vida en un momento muy difícil por el cual pasaba, me hiciste ver las cosas de diferente manera y siempre estar en esos momentos difíciles y buenos, por darme la oportunidad de conocerte y seguir conociéndote, sabes que siempre vas contar conmigo y ahí estaré para ti y por esos regaños, pero de igual manera por esas risas y carcajadas. ¡TE QUIERO MUCHO PAU!

A Tíos y Primos de familia Lira Flores y Moreno Vélez que siempre me apoyaron en ser la persona que soy, y siempre respetaron mis decisiones, gracias a todos ustedes que también son parte de mi familia.

A la Familia Zayas Mendoza y Mendoza Juárez, por su hospitalidad y amistad.

A la Ing. Olivia García Jurado por sus ánimos que contagia y gracias plenamente por el apoyo de buscar un artículo científico.

A la M.C. Valeria Vargas Carranza e hija Lic. Yareni Laillet García Vargas por su amistad, confianza y hospitalidad, además por el apoyo emocional durante esta etapa académica.

A la Ing. Deysi Mariel Gutiérrez Noyola, Lic. Celina Lizbeth Gallegos Castillo, Rubidia Alejandra Coronado Martínez, Eva María Juárez Salas, María Josselin Cancino Medina, Nuri Arahi Escobedo Islas, Magali Pineda Baylon, Lic. Nancy García, Ing. Fabiola Mondragón Sánchez, José Manuel Temoxtle González, Emilio Santiago Pérez, Verónica Michelle Escudero Pérez, Luz Elena Soto Vargas, Ing. Diana Laura Galván Carrillo, Ing. Adilene Castro Ugalde, Ing. Alejandro Churape Melena e Ing. Jonatan Sánchez Torres. Por su confianza, apoyo y motivación, por esos grandes momentos que pude convivir con cada una y uno de ustedes, que se quedaron marcados.

Al Ing. Juan Ramón Quintana Luna, Ing. Alejandra Sandi, Ing. Carlos Cruz Contreras, Ing. Augusto Cervantes, Ing. Héctor Alejandro García Ordoñez, Ing. Luis Villegas Vázquez, Ing. Jonathan Rodríguez, Ing. Nicasio Medrano e Ing. Tomás Manuel Rodríguez Sánchez y cada uno de los integrantes de la empresa CAAFF Consultoría Forestal S. de R.L. de C.V. gracias por su confianza para realizar prácticas profesionales, y ver la realidad de la profesión, además de adquirir conocimientos en materia.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|  | Página |
|--|--------|
| ÍNDICE DE CUADROS .....                                | ix     |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                | x      |
| RESUMEN .....  | xii    |
| ABSTRACT.....  | xiii   |
| 1. INTRODUCCIÓN .....                                  | 1      |
| 1.1 Objetivos e hipótesis .....                        | 6      |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....                         | 7      |
| 2.1 Plantaciones comerciales .....                     | 7      |
| 2.2 Descripción de <i>Cedrela odorata</i> L.....       | 8      |
| 2.3 Evaluación y monitoreo de plantaciones .....       | 9      |
| 2.3.1 Sitios permanentes.....                          | 10     |
| 2.4 Modelos de crecimiento .....                       | 10     |
| 2.5 Tipos de turno .....                               | 12     |
| 2.6 Estudios relacionados.....                         | 19     |
| 3. MATERIALES Y METODOS .....                          | 22     |
| 3.1 Antecedentes del área de estudio (Plantación)..... | 22     |
| 3.2 Localización del área de estudio .....             | 24     |
| 3.3 Aspectos ecológicos.....                           | 24     |
| 3.3.1 Fisiografía.....                                 | 24     |
| 3.3.2 Hidrología.....                                  | 24     |
| 3.3.3 Geología.....                                    | 25     |
| 3.3.4 Edafología.....                                  | 26     |
| 3.3.5 Clima .....                                      | 26     |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.3.6 | Vegetación.....  | 26 |
| 3.3.7 | Fauna .....  | 27 |
| 3.3.8 | Agricultura tradicional Roza-Tumba-Quema (RTQ) .....   | 27 |
| 3.4   | Diseño de muestreo y establecimiento de sitios permanentes .....                                   | 31 |
| 3.5   | Variables dasométricas .....   | 31 |
| 3.6   | Modelos de crecimiento .....   | 32 |
| 3.7   | Determinación de turno absoluto .....  | 32 |
| 3.8   | Determinación del Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) .....            | 33 |
| 3.9   | Determinación de turno técnicos.....   | 33 |
| 4.    | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....   | 35 |
| 4.1   | Ajuste de modelos de crecimiento .....   | 35 |
| 4.1.1 | Crecimiento en altura.....   | 35 |
| 4.1.2 | Crecimiento en diámetro normal .....   | 37 |
| 4.1.3 | Crecimiento en área basal.....   | 39 |
| 4.1.4 | Crecimiento en volumen.....  | 41 |
| 4.2   | Determinación del turno absoluto .....   | 43 |
| 4.2.1 | Estimación de incremento y de turno absoluto en altura total.....                                  | 43 |
| 4.2.2 | Estimación de incremento y de turno absoluto en diámetro normal .....                              | 43 |
| 4.2.3 | Estimación de incremento y de turno absoluto en área basal .....                                   | 44 |
| 4.2.4 | Estimación de incremento y turno absoluto en volumen total.....                                    | 49 |
| 4.3   | Estimación de turno técnico y análisis.....  | 49 |
| 4.3.1 | Determinación de dimensiones comerciales que demanda cedro rojo ( <i>Cedrela odorata</i> L.) ..... | 49 |
| 4.3.2 | Determinación de a través de las curvas de crecimiento ajustadas .....                             | 50 |
| 5.    | CONCLUSIONES .....   | 52 |

|    |                         |    |
|----|-------------------------|----|
| 6. | RECOMENDACIONES.....    | 53 |
| 7. | LITERATURA CITADA ..... | 54 |
|    | APÉNDICES .....         | 68 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   | Página |
|---|--------|
| Cuadro 1. Modelos de crecimiento con mayor ajuste para la especie de cedro rojo ( <i>Cedrela odorata</i> L.) en México.....   | 13     |
| Cuadro 2. Modelos de crecimiento utilizados para la estimación de altura, diámetro, área basal y volumen.....   | 15     |
| Cuadro 3. Principales usos, dimensiones de tablas, para <i>Cedrela odorata</i> L. en los estados de Aguascalientes, Oaxaca y Campeche.....                                    | 16     |
| Cuadro 4. Diámetros mínimos de corta para ( <i>Cedrela odorata</i> L.) y ( <i>Swietenia macrophylla</i> King.) en diferentes países.....                                      | 20     |
| Cuadro 5. Aspectos ecológicos de la plantación en San Pedro Pochutla, Oaxaca.....   | 30     |
| Cuadro 6. Modelos de crecimiento para la estimación de altura, diámetro, área basal y volumen para la plantación a 25 años de establecida.....                                | 34     |
| Cuadro 7. Modelos de crecimiento utilizados para la variable altura total de <i>Cedrela odorata</i> L. en plantación de enriquecimiento de acahual en Pochutla Oaxaca.....    | 36     |
| Cuadro 8. Modelos de crecimiento utilizados para la variable diámetro normal de <i>Cedrela odorata</i> L. en plantación de enriquecimiento de acahual en Pochutla Oaxaca..... | 38     |
| Cuadro 9. Modelos de crecimiento utilizados para la variable área basal de <i>Cedrela odorata</i> L. en plantación de enriquecimiento de acahual en Pochutla Oaxaca.....      | 40     |
| Cuadro 10. Modelos de crecimiento utilizados para la variable volumen total de <i>Cedrela odorata</i> L. en plantación de enriquecimiento de acahual en Pochutla Oaxaca. .... | 42     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   | Página |
|---|--------|
| Figura 1. Localización geográfica de las plantaciones forestales comerciales con enriquecimiento de acahual de <i>Cedrela odorata</i> L. en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.....   | 28     |
| Figura 2. Localización geográfica de las plantaciones forestales comerciales con enriquecimiento de acahual de <i>Cedrela odorata</i> L. en Santiago La Galera, Candelaria Loxicha, Pochutla, Oaxaca. ....  | 29     |
| Figura 3. Diagrama de dispersión de datos observados en campo, con una curva de ajuste del modelo mejor ajustado para la variable altura total (grafica superior) y curvas de ICA e IMA en relación a los estimados del modelo mejor ajustado (grafica inferior).....   | 45     |
| Figura 4. Diagrama de dispersión de datos observados en campo, con una curva de ajuste del modelo mejor ajustado para la variable diámetro normal (grafica superior) y curvas de ICA e IMA en relación a los estimados del modelo mejor ajustado (grafica inferior). La línea punteada representa el turno absoluto donde es la intersección del ICA e IMA..... | 46     |
| Figura 5. Diagrama de dispersión de datos observados en campo, con una curva de ajuste del modelo mejor ajustado para la variable área basal (grafica superior) y curvas de ICA e IMA en relación a los estimados del modelo mejor ajustado (grafica inferior). La línea punteada representa el turno absoluto donde es la intersección del ICA e IMA.....      | 47     |
| Figura 6. Diagrama de dispersión de datos observados en campo, con una curva de ajuste del modelo mejor ajustado para la variable volumen total (grafica superior) y curvas de ICA e IMA en relación a los estimados del modelo mejor ajustado (grafica inferior).....  | 48     |
| Figura 7. Gráfica de comportamiento de crecimiento en diámetro derivado del modelo con mejor ajuste de <i>Cedrela odorata</i> L. en San José Chacalapa, Pochutla,   |        |

Oaxaca y Candelaria Loxicha, Pochutla, Oaxaca, Nota: turno técnico de 25 años  
(1), 20 años (3) y de 35 cm de diámetro mínimo de corta (2). ..... 51

## RESUMEN

El presente estudio se realizó en la región de Pochutla, Oaxaca, para poder observar el comportamiento de crecimiento, determinación de turno absoluto en las variables de altura total, diámetro normal, área basal y volumen total y turno técnico en *Cedrela odorata* L. Se evaluaron 31 sitios permanentes de forma circular de 250 m<sup>2</sup>, en las plantaciones con enriquecimiento de acahual El Pénjamo, El Carnizuelo, El Mango, Arroyo Rico, El Riego y El Triunfo, se midieron las variables dasométricas de altura total y diámetro a 1.30 m. Por lo tanto, se tomaron datos de las evaluaciones de 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2017 y 2021 donde solo se ocuparon los datos de altura total y diámetro normal, de los que se obtuvo el área basal y volumen total. Se seleccionaron ocho modelos de tipo no lineal como Schumacher, Schumacher modificado por Bailey y Clutter, Chapman-Richards, Weibull, Von Bertalanffy, Gompertz, Sloboda y Hossfeld III para obtener un mejor ajuste. En la variable altura total el modelo de mejor ajuste fue Schumacher modificado por Bailey y Clutter donde la curva se comportó de manera exponencial inversa, en cambio para diámetro normal se ajustó el modelo de Gompertz, donde la curva se comportó es de manera sigmoideal, para área basal el modelo con mejor ajuste fue Schumacher, donde la curva presentó una forma sigmoideal, en volumen total el modelo con mejor ajuste fue Weibull, la curva se comportó en forma de J ya que está aún en crecimiento. En diámetro normal alcanzó el turno absoluto a una edad de 10.7 años, mientras que en área basal corresponde una edad de 20.5 años. El turno técnico de *Cedrela odorata* L. para las plantaciones forestales comerciales con enriquecimiento de acahual fue 25 años, mostrando ya una madera madura color rojizo.

Palabras clave: sitios permanentes, modelos de crecimiento, comportamiento sigmoideal, turno absoluto, turno técnico.

## ABSTRACT

The present study was carried out in the region of Pochutla, Oaxaca, in order to observe the growth behavior, determination of absolute rotation period in the variables of total height, normal diameter, basal area and total volume, and technical rotation period in *Cedrela odorata* L. 31 permanent circular sites of 250 m<sup>2</sup> were evaluated, in the plantations with enrichment of acahual El Pénjamo, El Carnizuelo, El Mango, Arroyo Rico, El Riego and El Triunfo, the dasometric variables of total height and diameter at 1.30 m.. Therefore, data from the evaluations of 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2017 and 2021 were taken, where only the data of total height and normal diameter were used, from which the basal area and total volume were obtained. Eight non-linear type models such as Schumacher, Schumacher modified by Bailey and Clutter, Chapman-Richards, Weibull, Von Bertalanffy, Gompertz, Sloboda and Hossfeld III were selected to obtain a better fit. In the total height variable, the model with the best fit was Schumacher modified by Bailey and Clutter where the curve behaved in an inverse exponential manner. Instead for normal diameter the Gompertz model was adjusted, where, the curve behaved is sigmoidal. For basal area, the model with the best fit was Schumacher, where the curve presented a sigmoidal shape. In total volume the model with the best fit was Weibull, the curve behaved in a J-shape since it is still growing. The normal diameter reached the absolute rotation period at an age of 10.7 years, while in basal area it corresponds to an age of 20.5 years. The technical rotation period of *Cedrela odorata* for commercial forest plantations with acahual enrichment was 25 years, already showing a reddish-colored mature wood.

Keywords: permanent sites, growth models, sigmoidal behavior, absolute shift, technical shift.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales son importantes para la producción industrial por ende ayuda a las actividades socio-económicas (Martínez *et al.*, 2006; CONAFOR, 2014). Inicialmente éstas estuvieron limitadas a zonas degradadas y zonas sin cobertura forestal para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales (Martínez *et al.*, 2006; CONAFOR 2020), en la actualidad las industrias forestales tienen establecidas plantaciones para poder satisfacer la demanda de productos (Martínez *et al.*, 2006; CONAFOR 2014). Dicha demanda se debe al crecimiento de la población en las últimas dos décadas y la baja productividad de los bosques naturales (Musálem, 2006; SEMARNAT, 2021).

Cabe señalar que en México se encuentran plantaciones forestales comerciales con diferentes fines industriales tales como celulósicos, resinas, madera en escuadría, tableros aglomerados, tableros contrachapados, donde principalmente en la región de trópico se utilizan las especies de eucalipto, teca, melina, caoba, cedro y paraíso (Martínez *et al.*, 2006; Fierros-González, 2012). Sin embargo, varias de las especies son exóticas, estas especies son aquellas que son introducidas fuera de su área de distribución natural (CONABIO, 2021). En México se ha fomentado las plantaciones de especies nativas (LGDFS, 2018), son aquellas que se encuentran dentro de su área de distribución natural, además cuenta con una dispersión potencial natural (CONABIO, 2021).

Las plantaciones con especies nativas son importantes y tienen como objetivo la conservación de las especies, en el sureste México dentro del trópico, además nos ayuda a la conservación de nichos ecológicos y disminuir la degradación de suelos (Martínez *et al.*, 2006) Las principales especies nativas plantadas en el sureste mexicano son cedro rojo (*Cedrela odorata* L.), caoba (*Swietenia macrophylla* King), laurel (*Cordia alliodora* Ruiz

& Pav. Oken), primavera (*Roseodendron donnell-smithii* (Rose) Miranda), maculis (*Tabebuia rocea* Bertol. DC.), guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum* Jacq. Griseb.), cedronogal (*Juglans pyriformis* Liebm) y siricote (*Cordia dodecandra* A DC.) (Carlson, 2004; Fierros-González, 2012).

De acuerdo a la Comisión Nacional Forestal en superficie de plantaciones forestales comerciales con especies maderables las dos principales especies son *Eucalyptus* sp. y *Cedrela odorata* L., donde destacan tres principales estados de la república mexicana con un total de 57,305 ha<sup>-1</sup> que representa en 57%, dichos estados son Veracruz, Tabasco y Campeche, y se encuentra del trópico de México (CONAFOR, s.f.).

Es importante conocer el turno de aprovechamiento ya que con el podemos ver una predicción de la producción media y máxima de la producción total (Trujillo-Ubaldo *et al.*, 2018), ya que la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS, 2018) indica que el turno de aprovechamiento es el periodo de regeneración de los recursos forestales que comprenden desde su extracción hasta el momento en que estos son susceptibles de nuevo aprovechamiento. Donde el alargar los turnos se puede obtener mayor duramen (Trujillo-Ubaldo *et al.*, 2018), ya que es el principal objetivo en *Cedrela odorata* L. (CONAFOR s.f.) además de dar servicios ambientales para el beneficio social (Trujillo-Ubaldo *et al.*, 2018).

Algunas de las razones por las que las plantaciones con especies nativas son muy escasas, es que los turnos son muy largos ya que pueden llegar a más 20 años, por otra parte, el Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN) negó los incentivos económicos para el establecimiento de plantaciones con especies nativas, por lo que hace falta investigación y desarrollo para un buen manejo silvícola en plantaciones (Carlson, 2004). La especie de *Cedrela odorata* L. se encuentra en la lista de Apéndices I, II y III de CITES, se encuentra en el Apéndice II (CITES, 2021) lo que indica que la especie no necesariamente está en peligro de extinción, pero esta anexada para controlar su comercio (CITES, 2022b), para trozas, madera aserrada, láminas de chapa de madera, y madera contrachapada (CITES, 2021). Por lo tanto, para su exportación de las especies que estén dentro de apéndice II aplica el artículo IV se consideran los criterios; a) que una Autoridad

Científica del Estado de exportación haya manifestado que esa exportación no perjudicará la supervivencia de esa especie; b) que una Autoridad Administrativa del Estado de exportación haya verificado que el espécimen no fue obtenido en contravención de la legislación vigente en dicho Estado sobre la protección de su fauna y flora (CITES, 2015). De acuerdo con CITES (2019) en México para el comercio internacional de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010 está bajo la categoría de protección especial lo que requiere un plan de manejo el cual deberá ir cotejado a la NOM-152-SEMARNAT-2006. Sin en cambio, la Ley General de Vida Silvestre (DOF, 2000) indica que para especies silvestres y poder realizar aprovechamiento se requiere que este en una Unidad de Manejo de para la Conservación de Vida Silvestre para la su registro y autorización se verifica su legal procedencia, con un plan de manejo para su comercialización o exportación.

Cabe señalar, que las zonas tropicales son un potencial para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales ya que por la ubicación geográfica cuenta con un clima, suelos favorables además de disposición de agua (López-Sánchez, 2004), por lo que se registran incrementos anuales para especies nativas como *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King., de 5 a 10 m<sup>3</sup>/ha<sup>-1</sup>/año y en especies introducidas principalmente *Eucalyptus* sp., de 30 a 50 m<sup>3</sup>/ha<sup>-1</sup>/año (Lindenmayer y Cunningham, 2000; Fierros-González, 2012).

De acuerdo con la CONAFOR existen diferentes tipos de plantaciones forestales comerciales como: plantaciones no maderables en zonas áridas y zonas tropicales, plantaciones maderables y celulósicos, plantaciones agroforestales, plantaciones de árboles de navidad y áreas de producción de semillas forestales (Fierros-González, 2012). Cabe mencionar que existen plantaciones con enriquecimiento de acahuales que tiene como objetivo contar con una mejor diversidad de especies dentro del nicho ecológico (Parraguirre, 1993), que ayuden a diversidad ecológica como también son plantaciones con especies de alto valor comercial, obtener beneficios económicos en un turno determinado de cosecha (Arteaga, 2004).

El cedro rojo es una especie que se puede propagar de manera asexual (estacas) y sexual (semillas) (Morales y Herrera, 2009), ya que para alcanzar los estándares de calidad y

cantidad en plantaciones forestales comerciales el mejoramiento genético es la herramienta para cumplir con los estándares antes mencionado (CONAFOR y AMEPLANFOR, A.C., 2016). Las empresas en sureste de México pretenden acortar los turnos en las plantaciones por medio de la selección del germoplasma (CONAFOR, 2011) donde se tiene que monitorear de donde proviene el germoplasma ya que tienen que ser árboles superiores con los mejores fenotipos además de ser resistentes a plagas y enfermedades (Morales y Herrera, 2009).

Por consiguiente, los sitios permanentes o parcelas permanentes son importantes en bosques templados como tropicales, porque ayudan a realizar cálculos más precisos de los cambios que van presentados los individuos (árboles) en sus diferentes variables de que se encuentran del sitio, donde la precisión va aumentar conforme se hagan evaluaciones más frecuentes, es decir cada año realizar una evaluación (FAO, 2015).

Por lo tanto, para poder evaluar el crecimiento se requiere del uso de los modelos de crecimiento para la toma de decisiones en el manejo forestal, además estos son importantes ya que contribuyen como una herramienta práctica para la silvicultura tanto como para bosques naturales y bosques artificiales (plantaciones) (Tamarit-Urias *et al.*, 2019).

En los bosques irregulares, ya sean templados o tropicales con especies de coníferas u hojosas, el comportamiento de la curva de crecimiento es de forma sigmoideal (Zeide, 1995; Domínguez-Calleros *et al.*, 2017), ya que para la determinación del crecimiento e incremento en un individuo con un rodal se utilizan principalmente los modelos no lineales: Schumacher, Chapman-Richards, Logístico, Gompertz y Weibull (Zeide 1999; Domínguez-Calleros, *et al.*, 2017).

El análisis de los modelos no lineales nos ayuda a ver la capacidad productiva por medio de los índices de sitio además de ver los turnos óptimos de aprovechamiento, para ver la eficiencia de los modelos se hace mediante una regresión no lineal, de cual obtener el coeficiente de la regresión mejor llamada como “ $R^2$  ajustada” por lo tanto se tiene que validar por medio los errores con los parámetros: Error medio del modelo, diferencia absoluta del

modelo y el coeficiente de determinación ajustado, se selecciona el modelo que mejor se ajuste a los datos observados en campo (Martínez-Zurimendi *et al.*, 2015).

Para poder determinar los turnos en plantaciones son importantes estos modelos, por lo tanto, las evaluaciones continuas de los sitios permanentes nos permitieran predecirlos. Por otra parte, el cedro rojo es una madera preciosa donde se busca el color rojo característico que produce el duramen, y este turno puede llegar entre los 20-25 años de establecida, por lo que se tiene que verificar si ya está producido el duramen (Morales y Herrera, 2009).

Por lo anterior, el estudio está enfocado a analizar el crecimiento y determinar el turno absoluto y técnico para el aprovechamiento en *Cedrela odorata* L. en la región de Pochutla, Oaxaca, en las plantaciones establecidas que son producto de un enriquecimiento de acahuales, a 25 años de ser establecida.

## 1.1 Objetivos e hipótesis

### Objetivo general

Estimar los turnos absolutos y técnicos de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en plantaciones de enriquecimiento de acahual a 25 años de establecidas en Pochutla, Oaxaca.

### Objetivos específicos

1. Definir el modelo de crecimiento no lineal que mejor ajuste tenga para las variables: diámetro normal, altura, área basal y volumen.
2. Estimar el turno absoluto a través del modelo de mejor ajuste para las variables: diámetro normal, altura área basal y volumen.
3. Estimar turnos técnicos de acuerdo al uso de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en la región de Oaxaca.

### Hipótesis

Ho: Al menos uno de los modelos no lineales es significativo a más del 90 % de confiabilidad con alguna de las cuatro variables, para la plantación a 25 años de establecida en la especie de *Cedrela odorata* L.

H1: Ninguno de los modelos no lineales son significativos para cualquiera de las cuatro variables, para la plantación a 25 años de establecida en la especie de *Cedrela odorata* L.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Plantaciones comerciales

De acuerdo con la Ley de Desarrollo Forestal Sustentable (DOF, 2018) una Plantación Forestal Comercial (PFC) es un cultivo de especies forestales establecidas en terrenos temporales forestales o preferentemente forestales, con propósitos, industriales y mercantiles.

Las plantaciones forestales en México iniciaron en los años 60's, por medio de empresas con permisos y el servicio forestal, donde principalmente se establecieron fue en áreas con vegetación secundaria (Acahuales) en el trópico (Arteaga e Izaguirre, 2004). México cuenta con condiciones orográficas únicas, por lo que es necesario considerar que cuenta con una superficie óptima para el establecimiento de plantaciones forestales donde se crean condiciones de protección hacia los recursos naturales tales como: clima, suelo, agua y fauna silvestre, por lo que son una alternativa para la protección de suelos agrícolas degradados y erosionados, además producir madera y tener beneficios socio-económicos (Musálem, 2006).

Las PFC es una actividad rentable a mediano y largo plazo, por lo que requiere una alta inversión, lo que conlleva riesgo para la recuperación económica, para tener éxito en PFC conlleva varias actividades, como una adecuada preparación de los terrenos y la disponibilidad de tecnología para la producción de planta de calidad (CONAFOR, 2021).

La industria de la celulosa ha sido el atractivo para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales, por lo que en climas templados se recomienda principalmente la especie de *Pinus*, mientras que en climas tropicales especies preciosas, las cuales resaltan cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) y caoba (*Swietenia macrophylla* King) ya que tiene un valor

comercial alto, además de tener una gran demanda por características físicas y anatómicas de la madera (Ramírez-García *et al.*, 2008).

México hasta el año 2008 contaba con una cubierta aproximada de 117,279 ha<sup>-1</sup> de PFC, donde el 85.2% de la superficie está representada por especies maderables tales como cedro rojo y eucalipto, distribuida en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche (CONFOR, s.f.). En el periodo de 2000-2020 en México establecieron 366,000 ha<sup>-1</sup> de PFC de las cuales 237,000 tienen fines maderables con especies como: eucalipto, cedro rojo, pino, teca y melina (CONAFOR, 2021).

## **2.2 Descripción de *Cedrela odorata* L.**

Pertenece a la familia Meliaceae, por lo tanto, tiene sinonimia con: *Cedrela adenophylla* Mart., *Cedrela mexicana* Roem., *Cedrela yucatanana* Blake, es nativa desde el neo-tropical de México a través de América Central hasta Argentina incluyendo el Caribe, se encuentra en zonas tropicales con rangos de 1500-4000 mm de precipitación anual (Salazar *et al.*, 2000). Su principal distribución en México se encuentra en una vertiente del golfo de México desde el sur de Tamaulipas, sureste de San Luis Potosí, Veracruz, Tabasco, Campeche hasta la península de Yucatán, y en parte del pacífico desde Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Guerrero, Oaxaca hasta la costa de Chiapas (Pennington y Sarukhán, 2005).

Es un árbol caducifolio de mediano a gran tamaño (Morales y Herrera, 2009), pueden tener alturas de hasta 35 m con Diámetro Altura del Pecho (DAP) de hasta 1.7 m, la parte del tronco presenta pequeños contrafuertes, ramas ascendentes y gruesas, copa densa de forma redondeada (Pennington y Sarukhán, 2005) fuste recto, bien formado (Morales y Herrera, 2009). Es una especie que se presenta abundantemente en la vegetación secundaria de diversas selvas (Pennington y Sarukhán, 2005).

Es una especie maderable de suma importancia para la industria forestal de México, ya que cuenta con propiedades físicas únicas en la madera de donde se puede obtener: tablonés, tablas y chapa, además se es una madera que cuenta con un excelente brillo y vetado, el cual es muy

importante su para su venta nacional e internacional (Pennington y Sarukhán, 2005; Morales y Herrera, 2009).

### **2.3 Evaluación y monitoreo de plantaciones**

Madrigal (2021) señala, que la evaluación de las PFC inicia en los años 70's la cual permite solucionar problemas y aprovechar oportunidades para obtener mejores resultados, por lo que en México las variables dasométricas son las mayormente consideradas y menos enfocados en los aspectos financieros de PFC.

El monitoreo ayuda a obtener información cualitativa como cuantitativa, por lo que permite conseguir información del comportamiento de la especie y genotipos lo que permite la selección de los mejores sitios, además se puede utilizar para poder estimar los factores climáticos, edáficos y fisiográficos que influyen el crecimiento de la especie (Zamudio, 2020) ya que del monitoreo forestal se puede determinar la calidad de sitio (Gadow *et al.*, 2007; Zamudio, 2020).

Existen varios tipos de evaluaciones en Plantaciones Forestales Comerciales (Madrigal, 2021):

- Evaluación técnica: analiza aspectos productivos, desde antes del establecimiento de la plantación hasta ver crecimiento y desarrollo de la plantación
- Evaluación financiera: analiza la rentabilidad del proyecto, por lo que desde el punto de vista empresarial se identifica los ingresos y los egresos después de la inversión
- Evaluación económica: analiza la contribución el bienestar, a partir del establecimiento del proyecto, desde el punto de vista social y de la nación
- Evaluación social: determina los impactos en la sociedad, impactos de un proyecto ya sea impactos directos o indirectos, la cual se hace por medio instrumentos cualitativos o cuantitativos
- Evaluación ambiental: identifica los impactos ambientales ya sean positivos o negativos.

- Evaluación dasométrica: evalúa la productividad de un sitio determinados, así pudiendo estimar la cantidad de madera del sitio, donde utiliza principalmente las variables de diámetro y de altura, las cual forman parte como indicadores de crecimiento.

### 2.3.1 Sitios permanentes

Son un instrumento que permite seguir el crecimiento y rendimiento del bosque con el objetivo de obtener información importante para la toma de decisiones durante el manejo forestal para ver los ciclos de corta, diámetros mínimos y volúmenes de corta (Corral-Rivas *et al.*, 2009).

El establecimiento de parcelas o sitios permanentes ayuda a las manejadores e investigadores forestales a observar y analizar diferentes variables silvícolas, económicas, ecológicas, sociales y culturales, los sitios permanentes pueden aplicarse en rodales irregulares y mixtos ya se en bosques templados como en bosques tropicales (Corral-Rivas *et al.*, 2013).

En el Estado de Chihuahua, México los Sitios Permanentes de Investigación Silvícola tienen una buena referencia en el monitoreo forestal de bosques templados el cual ayudará a generar conocimientos y nuevas tecnologías para tener mejores rendimientos de producción, proteger los recursos y aumentar el valor de bosques por medio del manejo forestal sustentable (Martínez-Salvador *et al.*, 2019).

El monitoreo de selvas, las cuales cuentan con estructuras complejas, y una gran diversidad de especies y varias clases de edad, se requiere analizar y establecer nuevas adaptaciones en el tamaño de los sitios y en las variables a evaluar (Corral-Rivas *et al.*, 2013).

## 2.4 Modelos de crecimiento

En unas especies forestales tropicales tienen una tendencia a crecer durante todo el año, por lo que especies de coníferas solo crecen de uno a dos meses por año, por lo tanto, el

incremento no es de igual manera, donde el crecimiento en altura es primero también llamado crecimiento primario, por consiguiente, el crecimiento en diámetro también llamado crecimiento secundario, por último, la raíz en climas tropicales o cálidos crece durante el invierno (Klepac, 1983).

El crecimiento de un organismo o de una población depende de los factores ambientales y para poder observar su comportamiento son importantes las ecuaciones de crecimiento; la ecuación se expresa en una curva en forma sigmoideal que tiende ser cóncava hacia arriba, y posteriormente convexa (Zeide, 1993).

En árboles tropicales es complejo ver el incremento y crecimiento, ya que la mayor parte de las especies tropicales no cuentan con anillos de crecimiento, por lo que las mediciones anuales en las parcelas permanentes son la base del desarrollo de los modelos de crecimiento (Domínguez-Calleros *et al.*, 2017). Dentro de las ecuaciones matemáticas podemos encontrar los modelos de crecimiento, pueden ser precisos y realistas, por lo que tiene una importancia en la ordenación forestal, para los bosques tropicales, es uno de los ecosistemas complejos, por la diversidad de especies, donde el desafío es modelar crecimiento (Vanclay, 1995).

Para realizar el modelaje de crecimiento de una masa forestal, se requieren datos obtenidos de parcelas permanentes, porque la información obtenida será más detallada, ya que permite ver el comportamiento de las etapas de desarrollo (Corral *et al.*, 2005). Los modelos de crecimiento tienen como objetivo determinar el proceso de evolución de las variables de dendrométricas o dasométricas en un cierto tiempo; los modelos para árboles individuales son más detallados que los modelos para rodales, por lo que es necesario que las mediciones en campo sean más precisas lo que implica un mayor esfuerzo en la toma de datos (Gómez-García, 2013) son de suma importancia para el manejo de ecosistemas forestales (Domínguez-Calleros *et al.*, 2017). Estos modelos son matemáticos donde podemos ver y analizar la regeneración, competencia, reclutamiento y mortalidad (Corral *et al.*, 2005).

Zeide (1993) menciona que el futuro la ecología de masas forestales está en modelación de ecuaciones de crecimiento, por lo que se va poder ver a largo plazo, por lo tanto, las

ecuaciones de crecimiento no han perdido importancia a pesar de la llegada de los modelos informáticos. Para el siglo XXI los modelos de crecimiento son la medida para manejar de manera integral la planificación y la gestión forestal, las cuales deben incluir alternativas silvícolas, lo cual ayudará a proporcionar información sobre la calidad de árboles y rendimientos de productos, y predecir información al largo plazo (Peng, 2000). Las ecuaciones de crecimiento tienen una relación en la edad con el tamaño de la variable (Zeide, 1993). En el Cuadro 1 se puede observar los modelos que mejor se han ajustado en varios estudios realizados en México principalmente para la especie de cedro rojo, por otra parte, se muestran las ecuaciones de dichos modelos (Cuadro 2).

## 2.5 Tipos de turno

De acuerdo a la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (DOF, 2018) define, que el turno o edad de cosecha es el periodo de regeneración de los recursos forestales que comprende desde su extracción hasta el momento en que estos son susceptibles de nuevo aprovechamiento.

El turno o edad de rotación es el criterio de madurez en el periodo de años que un rodal o una especie tiene para crecer hasta una condición de madurez económico o biológico (Valdez, 2004; Gagnon, 2013; Gual et al., 2019). El turno depende del producto u objetivo deseado, por lo que los turnos económicos son más cortos que los turnos biológicos (Gagnon, 2013).

De acuerdo con Bettinger, Boston, Siry y Grebner (2009), identificaron siete tipos de criterios de madurez (turno) en rodales de edad uniforme, los cuales son: físico, técnico, silvícola, biológico, financiera, económico y comercial.

Por lo tanto, Díaz (1997), Valdez (2004), Casals (2005), Bettinger *et al.*, (2009) y Trujillo-Ubaldo *et al.*, (2018) definen los diferentes tipos de turnos o criterios de madurez como:

Cuadro 1. Modelos de crecimiento con mayor ajuste para la especie de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en México.

| Nombre          | Autor y año               | Tema   | Especies   |
|-----------------|---------------------------|--|--|
| Chapman-Richard | Quintero, 2005            | Crecimiento de dos especies tropicales maderables en plantaciones comerciales.                     | <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Swietenia macrophylla</i> King.   |
|                 | Galán, 2007               | Crecimiento y rendimiento de especies arbóreas en una plantación con enriquecimiento de acahuales. | <i>Cedrela odorata</i> L., <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose., <i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.), <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.   |
|                 | Galán <i>et al</i> ; 2008 | Crecimiento y rendimiento maderable  | <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose.  |
| Von Bertalanffy | Quintero, 2005            | Crecimiento de dos especies tropicales maderables en plantaciones comerciales.                     | <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Swietenia macrophylla</i> King.   |
| Gompertz        | Quintero, 2005            | Crecimiento de dos especies tropicales maderables en plantaciones comerciales.                     | <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Swietenia macrophylla</i> King.   |
| Sloboda         | Quintero, 2005            | Crecimiento de dos especies tropicales maderables en plantaciones comerciales.                     | <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Swietenia macrophylla</i> King.   |
| Schumacher      | Bravo, 2007               | Estimación maderable y evaluación financiera de plantaciones forestales comerciales.               | <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Swietenia macrophylla</i> King.   |
|                 | Vega, 2013                | Evaluación de plantaciones comerciales.  | <i>Cedrela odorata</i> L., <i>Swietenia macrophylla</i> King., <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose., <i>Juglans olanchana</i> S&L., <i>Tectona grandis</i> L., <i>Casuarina equisetifolia</i> L. ex |

|  |                 |   |   |
|--|-----------------|---|---|
|  |                 |   | J.R. & G. Forst. y <i>Gmelina arborea</i> Roxb.   |
| Weilbull   | Sandoval, 2010  | Crecimiento en diámetro y altura en plantaciones comerciales.   | <i>Cedrela odorata</i> L., <i>Swietenia macrophylla</i> King. y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose.                                     |
|  | Cruz, 2013      | Crecimiento en plantaciones con enriquecimiento de acahual y agroforestal.                                | <i>Cedrela odorata</i> L., <i>Swietenia macrophylla</i> King. y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose.                                     |
|  | Ruiz, 2015      | Crecimiento y turno absoluto a 17 años de establecimiento en plantaciones con enriquecimiento de acahual. | <i>Cedrela odorata</i> L.   |
| Logarítmico                                      | Palomeque, 2011 | Evaluación dasométrica de una plantación  | <i>Cedrela odorata</i> L.   |
| Schumacher<br>modificado por<br>Bailey & Clutter | Santiago, 2012  | Análisis de crecimiento en diámetro y altura en plantaciones comerciales.                                 | <i>Cedrela odorata</i> L., <i>Swietenia macrophylla</i> King. y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose.                                     |
|  | Avendaño, 2018  | Crecimiento y turno absoluto en plantaciones con enriquecimiento de acahual.                              | <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose.   |
|  | Velázquez, 2018 | Crecimiento en plantaciones con enriquecimiento de acahual.   | <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Swietenia macrophylla</i> King.  |
| Hossfeld III                                     | Contreras, 2021 | Evaluación integral de una plantación comercial proveniente de una acahual enriquecido                    | <i>Cedrela odorata</i> L., <i>Swietenia macrophylla</i> King., <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose., <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC. |

Cuadro 2. Modelos de crecimiento utilizados para la estimación de altura, diámetro, área basal y volumen.

| Nombre del modelo                                | Ecuación                                |
|--|---|
| 1. Chapman-Richard                               | $y = a(1 - e^{-(bx)})^c$                |
| 2. Von Bertalanffy                               | $y = a(1 - e^{-bx})^3$                  |
| 3. Gompertz                                      | $y = ae^{-be^{-cx}}$                    |
| 4. Sloboda                                       | $y = ae^{-be^{-cx^d}}$                  |
| 5. Schumacher                                    | $y = ae^{-\frac{b}{x}}$                 |
| 6. Weibull                                       | $y = a(1 - (e^{-(bx^c)}))$              |
| 7. Logarítmico                                   | $y = a + b * \log(x)$                   |
| 8. Schumacher modificado por<br>Bailey & Clutter | $y = e^{(a - (\frac{b}{x^c}))}$         |
| 9. Hossfeld III                                  | $y = \frac{x}{(a + b * \ln(x) + c(x))}$ |

Dónde: y=variable de estudio; a, b, c, d= parámetros de regresión; x= edad; e= base de logaritmos de naturales.

- Turno físico: es en el que los árboles o masas forestales se conservan o mantienen hasta su duración natural de vida.
- Turno silvícola: es el que los árboles o masas forestales se mantienen hasta que las mismas tengan la capacidad de producir semillas (germoplasma) viable.
- Turno técnico: es el que donde los árboles o masas forestales se mantienen con la finalidad de producir cierto tipo de productos.
- Turno financiero: es el que se obtiene a una edad de la masa forestal, cuando se produce el máximo porcentaje de capitalización del suelo y de volumen de madera pie.

Cuadro 3. Principales usos, dimensiones de tablas, para *Cedrela odorata* L. en los estados de Aguascalientes, Oaxaca y Campeche.

| Técnico                   | Entidad                              | Diámetro mínimo de corta  | Dimensiones de tablas, tablonos o cuartones  | Principales usos  |
|---------------------------|--------------------------------------|---|--|---|
| (Durón-Ramos, 2022)       | Aguascalientes, Aguascalientes       | -   | Tablas y tablonos de 14 ft de longitud la cual proviene de Centro América. La madera nacional de 8-10 ft de longitud y de 8-16” y más pequeñas, de espesor las tablas 1” pulgada y tablonos de 1.5-2” de espesor. Los cuartones 8X8”, 6X8” y 6X10” los cuales proviene Veracruz de ramas. Aguascalientes está a \$35.00 pesos mexicanos el pt. | Para puertas se necesitan tablonos e hasta 2” de espesor. Muebles pequeños se ocupan tablas de 1” de espesor. Para lambrin máximo de 4” de ancho y 0.5” de espesor. En Veracruz el uso que más se le da es para muebles provenzal lo cual indica que lleva un modelo de talla de figuras. En Misantla, Veracruz se ha usado para muebles de provenzal para comedores. |
| (Morales-Hernández, 2022) | San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca | En plantaciones para hacer aprovechamiento tiene que llegar al turno, porque es muy raro que haya cortas intermedias, ya que la madera es muy tierna. En la plantación con enriquecimiento de acahual en Pochutla, Oaxaca fue afectada en el año 2012 por el huracán Manuel | Los tablonos son de 1.5” en delante hasta 3.5” de 4” es muy raro de espesor, de ancho van de 8-12”, y en longitud van de 8-16ft o hasta 20ft, en pedacería se maneja de 3-4 ft de longitud. Por lo regular esta madera se seca en sombra, para no tener mal formaciones o grietas.   | Por lo que a los 25 años de la plantación ya se pueden sacar productos como madera aserrada. En el año 2013 se rescató madera tierna de los árboles que derribo el huracán “Manuel”, la cual utilizó para de tal manera que primero la aserró, la stufo y posterior la espigo para unir las tiras y a la enlistono las  |

|                              |                            |  |   |   |
|------------------------------|----------------------------|--|---|---|
|                              |                            | <p>que azotó la costa de Oaxaca, como consecuencia afecto a individuos de cedro rojo se rescató madera tierna donde se encontraban diámetros de hasta 20 cm.</p>   |   | <p>tiras para sacar el tablero del tamaño del triplay.</p> <p>Otro uso muy importante en la zona se ha manejado de forma artesanal para muebles.</p>  |
| <p>(Morales-López, 2022)</p> | <p>Escárcega, Campeche</p> | <p>Para aprovechamiento maderable en selvas de acuerdo a la NOM-152-SEMARNAT-2006, donde se manejan turno en años (DOF, 2008) mientras tanto el plan de Quintana Roo dice que de manera natural el diámetro mínimo de corta es de 55 cm (Flachsenberg y Galletti, 1999), por lo que se encuentra en áreas de conservación y es muy difícil. Por lo tanto, en Escárcega, Campeche se ha reducido hasta 35 cm en estado natural.</p> <p>En aprovechamiento ilegal los carpinteros locales ocupan diámetros de hasta 20 cm.</p> | <p>Tablas con un grosor 1” de longitud 6-10 ft de 4-6” de ancho, y en tablones para ser tiene que estar de grueso arriba de las 2 pulgadas.</p> | <p>Principalmente se usa para muebles (comedores), son muebles cuadrados.</p> <p>Otra principal industria es para la elaboración de bastidores para abejas por lo que es liviano y lo duradera que es la madera, tradicionalmente eran hechas de cedro rojo en la actualidad se siguen haciendo de cedro rojo, y se combinan con algunas maderas duras y de macuil (<i>Tabebuia rosea</i> Bertol.).</p> |

- Turno absoluto: es el que se obtiene a una edad de la masa forestal cuando esta produzca la mayor cantidad de madera, esto ocurre cuando se iguala el Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA).
- Turno cultural: es el que donde los árboles o masas forestales se mantienen con el propósito de mejorar el suelo y ser aprovechado cuando haya cumplido el objetivo.
- Turno económico: es el que se obtiene a una edad de la masa forestal cuando se produce el máximo rendimiento en precio por concepto de venta.
- Turno legal: es el que está fijado por una ley y este se determina con el diámetro mínimo de corta.

Otro de los criterios para aprovechamientos en estado natural y en plantaciones forestales comerciales de especies tropicales es el diámetro mínimo de corta (Cuadro 3). Para los bosques tropicales la determinación de diámetro mínimo de corta debe garantizar la regeneración natural de la especie, madurez óptima en el individuo, y tener un buen estado fitosanitario (Arreaza-Rodas, 2017). En Estado de Campeche, México en los programas de manejo para especies preciosas, en algunos ejidos y comunidades el diámetro mínimo de corta ha bajado hasta 45 cm de DAP (Argüelles-Suárez *et al.*; 2007). Por otra parte, en estados como Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz, Yucatán además de Campeche el diámetro mínimo de corta en especies preciosas es de 50 cm de DAP (Gallegos-Rodríguez *et al.*; 2012). Específicamente en el Ejido Álvaro Obregón, Calakmul, Campeche han determinado un diámetro mínimo de corta en su programa de manejo de 55 cm para la especie de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) (Herrera-Gloria, 2009). En otros países acuerdo a Morales-Castillo (2005) en Quito, Ecuador en los bosques tropicales el diámetro mínimo de corta va de los 40-60 cm que está establecido en el Acuerdo Ministerial 039 de Ministerio del Ambiente. Para la especie de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en bosques naturales en el país de Guatemala los diámetros mínimos de corta son de 55 a 60 cm (Arreaza-Rodas, 2017) mientras en México con la misma especie su diámetro mínimo de corta es de 55 cm (Herrera-Gloria, 2009). De acuerdo a Morales y Herrera (2009) indican que en plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. en el Estado de Yucatán, México los diámetros para poder ser aprovechados deben de llegar a los 45 cm de DAP.

Los países tienen predefinidos los diámetros mínimos de corta de acuerdo a las leyes y normas que rigen en cada país, por lo que los técnicos para cambiar el diámetro mínimo de corta, deberá tener una justificación técnica (Arreaza-Rodas, 2017). (Cuadro 4) por lo tanto, es importante mencionar que influyen los tipos de clima principalmente la precipitación media anual donde, *Cedrela odorata* L. la podemos encontrar en diferentes climas como cálido húmedo que tiene precipitaciones mayores de 2000 mm hasta 4000 mm anuales, cálido subhúmedo donde se presentan precipitaciones de 1000 mm - 2000 mm anuales, y cálido seco se presentan precipitaciones de 700 mm a 1500 mm (INEGI, 2005a; INEGI, 2017) en este último tipo de clima entran las plantaciones que están establecidas en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca (Morales-Hernández, 2022).

La venta nacional de madera de cedro rojo se va en tablas principalmente a Guadalajara, Sonora y Ciudad de México; esta madera se seca en sombra para que no llegue a mal formarse; por lo tanto, una de las maderas que está sustituyendo al cedro rojo es la melina. La madera color rojiza del cedro rojo en la región de Escárcega, Campeche se le conoce como madera madura (Morales-López, 2022). Por lo tanto, Silva-Guzmán (2007) dice que, la madera de cedro rojo que gradualmente es de color castaño rojizo claro a oscuro se le conoce como duramen. Vignote-Peña (2014), da a conocer que en cedro rojo la madera de color rosa a pardo rosa claro, se le conoce como duramen. Además, *Cedrela odorata* L. es una de las especies que presentan anillos de crecimiento (Beltrán y Valencia, 2013) (Apéndice 7 y 8).

## **2.6 Estudios relacionados**

En México existen varios estudios relacionados con Estimación de turno y crecimiento en cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en plantaciones forestales.

En San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca se han realizado una gran diversidad de estudios en una plantación forestal comercial con enriquecimiento de acahual para estimar crecimiento, determinación de turno óptimo, viabilidad financiera y rendimiento maderable en las especies: *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King., *Tabebuia donnell-smithii* Rose., *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.). y *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. (Quintero, 2005;

Galán, 2007; Galán *et al.*, 2008; Sandoval, 2010; Santiago, 2012; Cruz, 2013; Ruiz, 2015; Avendaño, 2018; Velázquez, 2018; Contreras, 2021).

Cuadro 4. Diámetros mínimos de corta para (*Cedrela odorata* L.) y (*Swietenia macrophylla* King.) en diferentes países.

| <b>País</b> | <b>Especie</b>                        | <b>Establecido<br/>en 2010</b> | <b>Establecidos<br/>en 2011</b> |
|-------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| El Salvador | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          | 60 cm                          |                                 |
| Honduras    | ( <i>Swietenia macrophylla</i> King.) | 70 – 90 cm                     |                                 |
| Guyana      | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          | Igual o mayor a 30<br>cm       |                                 |
| Ecuador     | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          |                                | 60 cm                           |
|             | ( <i>Swietenia macrophylla</i> King.) |                                | 60 cm                           |
| Bolivia     | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          |                                | 60 cm                           |
|             | ( <i>Swietenia macrophylla</i> King.) |                                | 70 cm                           |
| Nicaragua   | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          |                                | 50 cm de DAP                    |
|             | ( <i>Swietenia macrophylla</i> King.) |                                | 50 cm de DAP                    |
| Colombia    | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          |                                | Igual o mayor a 40<br>cm        |
| Brasil      | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          | 50 cm                          | 50 cm                           |
|             | ( <i>Swietenia macrophylla</i> King.) |                                | 60 cm                           |
| Costa Rica  | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          | 60 cm                          | 60 cm                           |
| Guatemala   | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          | 55 – 60 cm de DAP              | 55–60 cm de DAP                 |
|             | ( <i>Swietenia macrophylla</i> King.) |                                | 60 cm de DAP                    |
| México      | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          | 30 – 50 cm                     | 20 – 55 cm                      |
|             | ( <i>Swietenia macrophylla</i> King.) |                                | 30 – 55 cm                      |
| Perú        | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          | 65 cm                          | 65 cm                           |
| Cuba        | ( <i>Cedrela odorata</i> L.)          | 32 cm                          | 32 cm                           |

Fuente: CITES, 2022a

En otras partes como Tuxtepec, Oaxaca, se realizó un estudio con fin de una estimación volumétrica maderable y evaluación financiera de una plantación forestal comercial de *Cedrela odorata* L. y *Swietenia macrophylla* King. tiene de establecidas de 18-84 meses (Bravo, 2007).

En Mapastepec, Chiapas, en plantaciones forestales comerciales se han realizado estudios para estimar crecimiento y rendimiento volumétrico maderable en una plantación de *Cedrela odorata* L. con 6.07 años de establecida (Palomeque, 2011). En Los Tuxtlas, Veracruz, se evaluó el desarrollo de una plantación forestal comercial que fue establecida de 1994 a 1996 con las especies *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King., *Tabebuia donnell-smithii* Rose., *Juglans olanchana* S&L., *Tectona grandis* L., *Casuarina equisetifolia* L. ex J.R. & G. Forst. y *Gmelina arborea* Roxb. (Vega, 2013). En Tihuatlán, Veracruz, se realizó un estudio de potencial productivo: estimación de crecimiento fisiológico mediante el modelo 3-PG por medio de los sistemas en *Cedrela odorata* L. en una plantación establecida en 2014 (Montero-Solís *et al.*, 2019).

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 Antecedentes del área de estudio (Plantación)

Las plantaciones se establecieron en el año 1997 en los meses de junio-julio en los predios “El Pénjamo”, “El Carnizuelo”, “El Mango”, “Sin Nombre”, “Arroyo Rico” y “El Riego”, municipio y distrito de San Pedro Pochutla y “El Triunfo” en el municipio de Candelaria Loxicha, distrito de San Pedro Pochutla, con el objetivo de enriquecimiento de acahual, se utilizó una mezcla de especies tropicales nativas: *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King., *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken., *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose. (Apéndice 1) con una densidad de 1,111 plantas/ha<sup>-1</sup> a un espaciamento de 3x3 m entre plantas (Morales, 1997).

Morales-Hernández(2022), indica en materia de silvicultura para plantaciones forestales comerciales con enriquecimiento de acahuales, lo más importante es la especie que se introduce al medio físico por las plagas que valla a presentar, es muy importante manejar con mucha precaución la apertura o modificación del acahual por lo que se tiene que ir eliminado paulatinamente los matorrales y el arbolado de menor calidad que no se consideran en los objetivos de la plantación; el acahual empieza a modificarse de manera significativa en el año 5, posteriormente en el año 10, 15 y 20 este último año las especies plantadas y cultivadas bajo las técnicas silvícolas, donde se incluyen las especies nativas de importancia comercial que se van restableciendo durante este predio a los cuales se les aplica silvicultura de tal manera que al año 25 se cumpla el objetivo establecido en el programa de plantación forestal comercial, llegando a cumplir el ciclo de producción para iniciar la cosecha, extracción, y transporte de los productos para su transformación y comercialización. Es importante recalcar que la silvicultura fundamental en gran medida está relacionado al manejo de acahual, a su vez con las especies plantadas y especies nativas reestablecidas, este proceso

tiene una importancia primordial por lo que se requiere de un responsable técnico forestal con experiencia en este tipo de ecosistema, además de estar en coordinación permanente con el inversionista, y la capacitación permanente a todos los trabajadores que participan, lo cual redundará en un equipo de trabajo que le da el éxito al proyecto, de no ser así proliferan los fracasos como experiencia se tienen en diversas plantaciones apoyadas con programas y recursos gubernamentales en esta región costa y en diferentes puntos geográficos del país.

Se deben considerar las siguientes acciones:

1. Al hacer la plantación, se hacen carriles de 1 m de ancho en el acahual y se separan 3 m entre carril y carril.
2. La plantación se hace al iniciar el periodo de lluvias y al final de este periodo se da la primera limpia de carril (vegetación herbácea y matorral) secuencia de actividades que se da 2 veces durante el periodo de lluvias en los primeros 5 años.
3. Después de los 5 años se tiene que ir abriendo la vegetación del acahual hacia arriba y con raleo hacia los lados del carril.
4. Hasta que la especie de importancia plantada o natural reestablecida salga del acahual con 10 o 15 m de altura a una edad de 10 años.
5. De 15-20 años se sigue el mismo procedimiento hasta dejar en plena libertad a la especie plantada o natural reestablecida a lo que en términos prácticos le calificamos como una etapa de corta preparatoria.
6. Y por último en la edad de 20-25 años se le aplica como silvicultura de mejoramiento una poda eliminando aquellas ramas con entrenudos en el fuste que puedan mejorar la calidad de fuste y aumentar en altura el fuste limpio comercial.

Cabe mencionar estos puntos son parte de las experiencias de la silvicultura y manejo forestal de una plantación de enriquecimiento de acahuales que está generando el responsable técnico forestal de la plantación, Ing. Juan Morales Hernández como apoyo, para las futuras plantaciones de enriquecimiento de acahuales para selva mediana caducifolia de clima cálido seco, principalmente de la costa del Pacífico y el Istmo.

### **3.2 Localización del área de estudio**

El área de estudio se localiza en la comunidad de San José Chacalapa, municipio y distrito de San Pedro Pochutla, Oaxaca, con coordenadas geográficas 15° 50' y longitud oeste 96° 28' con una altitud de 220 msnm, donde se encuentran los polígonos de las plantaciones denominadas; “El Pénjamo”, “El Carnizuelo”, “El Mango”, “Arroyo Rico” y “El Riego”, esta última plantación se encuentra bajo un sistema agroforestal con cultivos de café (*Coffea* sp.) (Figura 1). Otra plantación evaluada fue “El Triunfo” que se encuentra bajo un sistema agroforestal con cultivo de café (*Coffea* sp.), se ubica en la comunidad de Santiago La Galera, municipio de Candelaria Loxicha, distrito de San Pedro Pochutla, Oaxaca con las coordenadas geográficas latitud norte 15° 55' y longitud oeste 96° 29', con una altitud de 1190 msnm (Figura 2) (INEGI, 2000).

### **3.3 Aspectos ecológicos**

#### **3.3.1 Fisiografía**

Las plantaciones se encuentran en la Provincia Sierra Madre Sur (INEGI, 2001a), las plantaciones ubicadas en San José Chacalapa se encuentran en la Sub-provincia Costas del Sur, mientras que, la plantación de Santiago La Galera se encuentra en la Sub-provincia Cordillera Costera de Sur (INEGI, 2001b), la orografía en el predio de “El Triunfo” ubicado en Santiago La Galera se encuentra a una altitud de 1190 msnm con pendientes del 70% a 85%; los predios de “El Pénjamo”, “El Carnizuelo”, “El Mango”, “Sin Nombre”, “Arroyo Rico” y “El Riego” ubicados en San José Chacalapa, se encuentra a una altitud de 200 a 400 msnm con pendientes menores al 40% (INEGI, 2005c).

#### **3.3.2 Hidrología**

Los siete predios de las plantaciones establecida se encuentran dentro de la Región Hidrológica RH-21 Costa de Oaxaca (Puerto Ángel), en la cuenca C Copalita y en la subcuenca C del río Tonameca (INEGI 2000). En la región de la costa de pacifico se

presentan frecuentemente fenómenos meteorológicos (huracanes, ciclones, tormentas tropicales, así como también la presencia de canícula que es un periodo donde aumentan las temperaturas y disminuyen las lluvias), es de suma consideración, por los riesgos que se presentan para el establecimiento como el manejo de una plantación forestal comercial (Morales-Hernández, 2022).

### 3.3.3 Geología

En la comunidad de San José Chacalapa principalmente se dan origen a dos tipos de rocas, las cuales están con la clave: JtKbe(?)Sv la cual su litología es Volcano Sedimentario, son del grupo de rocas sedimentarias, que se originan por causa de agentes externos como erosión hídrica, eólica o por cambios de temperatura; por su composición pertenece a las No Clásticas o Químicas que son originadas por precipitación química en cuerpos de agua, y está constituida por fragmentos por cualquier mecanismo y depositada en ambientes continentales o marinos se originaron en la era Mesozoica en el periodo Jurásico-Cretácico; por otra parte las ToGd con litología Granodiorita, por lo que pertenece al grupo de rocas Ígneas, las cuales se originan de la fundición de materia en el interior de la corteza, que al solidificarse recibe el nombre de magma, por su lugar de formación son Intrusivas la cuales contienen una gran concentración de sílice acida con una concentración de 65% , ya que es un roca plutónica que está compuesta por cuarzo, plagioclasas y una cantidad menor de feldespato alcalino se originaron en la era Cenozoica en el periodo Terciario, por lo tanto en la comunidad de Santiago La Galera se encuentra pTmCM con litología Complejo Metamórfico son rocas que fueron a causa de condiciones físicas o químicas, como la elevación de temperatura y presión y dieron origen en la era Precámbrica en el periodo Proterozoico (INEGI, 2005b y SGM, 2022). Así también en la región se presentan fenómenos naturales como: terremotos, mar de fondo, los cuales son de gran consideración para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales (Morales-Hernández, 2022).

### 3.3.4 Edafología

En el municipio de Candelaria Loxicha, se encuentran suelos Luvisol Crómico estos son suelos con acumulación de arcilla de color rojo o amarillentos de fertilidad moderada con capacidad alta de proporcionar nutrientes las plantas; en San José Chacalapa se encuentran los suelos Regosol Eútrico son suelos con poco desarrollo por afloramientos de roca, son de color claro, pobres en materia orgánica, ligeramente de ácidos a alcalinos; y los Feozem Háptico son suelos simples de color pardo, se caracterizan por tener una capa superficial oscura, suave y ricas de materia orgánica y nutrientes (INEGI, 2004).

### 3.3.5 Clima

En Santiago La Galera, municipio de Candelaria Loxicha el clima se representa con A(c)m(w)igw, es un clima semi-cálido, húmedo con lluvias en verano, por lo que presenta una temperatura media anual de 24.8 °C y una precipitación media anual de 2,627.8 mm. En San José Chacalapa el clima es AW<sub>o</sub>(W)igw es un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano con una humedad baja, ya que presenta una temperatura media anual de 26.8 °C y una precipitación media anual de 872.0 mm (García, 1981; INEGI, 2005a).

### 3.3.6 Vegetación

En las plantaciones establecidas en San José Chacalapa la vegetación corresponde a selva baja caducifolia, donde se desarrollan especies características como: *Enterolobium cyclocarpum* Jack., *Brosimum alicastrum* Swartz., *Gliricidia sepium* Jack. y *Astronium graveolens* Jack., además, se observaron unos ejemplares de *Ceiba pentandra* L. En la plantación establecida en Santiago La Galera, municipio de Candelaria Loxicha el tipo de vegetación corresponde selva mediana subperennifolia donde las especies características son: *Enterolobium cyclocarpum* Jack., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Leucaena* sp., *Acacia* sp., entre otras (INEGI, 1984).

Debido a las actividades agrícolas y el crecimiento de población a paso a vegetación secundaria o mejor conocida como “acahual”, por lo tanto, además podemos encontrar especies frutales como: *Annona muricata* L., *Citrus X Sinensis* (L.) Osbeck., *Musa paradisiaca* L. además de *Coffea* sp. (Morales, 1997).

### 3.3.7 Fauna

En la región de San José Chacalapa se puede apreciar una variedad de fauna: Armadillo (*Dasypud novemcinctus* L.), Conejo (*Silvira guscunicularis* Waterhose), Iguana prieta (*Ctenosaura similis* Gray), Nauyaca (*Porthidium dumni* Hartweg & Oliver), Tlacuache (*Didelphis marsupialis* L.), Víbora de cascabel (*Crotalus* sp.) y Zorrillo (*Mephitis macroura* Lichtenstein) (INEGI, 1995).

### 3.3.8 Agricultura tradicional Roza-Tumba-Quema (RTQ)

Es una actividad indiscutible prehispánica para producción de cultivos básicos de alimentación (Lara *et al.*, 2012; Pérez y del Catillo, 2018; Gamero-Gamero *et al.*, 2020) la cual consiste en el desmonte de vegetación donde se derriban árboles de gran tamaño, posterior los bejucos y herbáceas y se deja secar por consiguiente se le prende fuego (Lara *et al.*, 2012) esta actividad se realiza en los meses de febrero a mayo donde el tipo de terrenos óptimos tienen que ser planos con suelos negros y profundos (Lara *et al.*, 2012; Venegas, 2016) también se realiza lomeríos con un buen drenaje (Morales-Hernández, 2022) se prohíbe tumbar la vegetación de acahuales que sobrepase de los 10 años de edad (Venegas, 2016) esta actividad se realiza en diferentes tipos de vegetación, bosques mesofilo de montaña, selva mediana y baja subperennifolia, selva baja caducifolia y vegetación riverseña (Lara *et al.*, 2012; Venegas, 2016; Pérez y del Catillo, 2018; Gamero-Gamero *et al.*, 2020) por lo que es la principal causa de incendios forestales en las zonas tropicales.

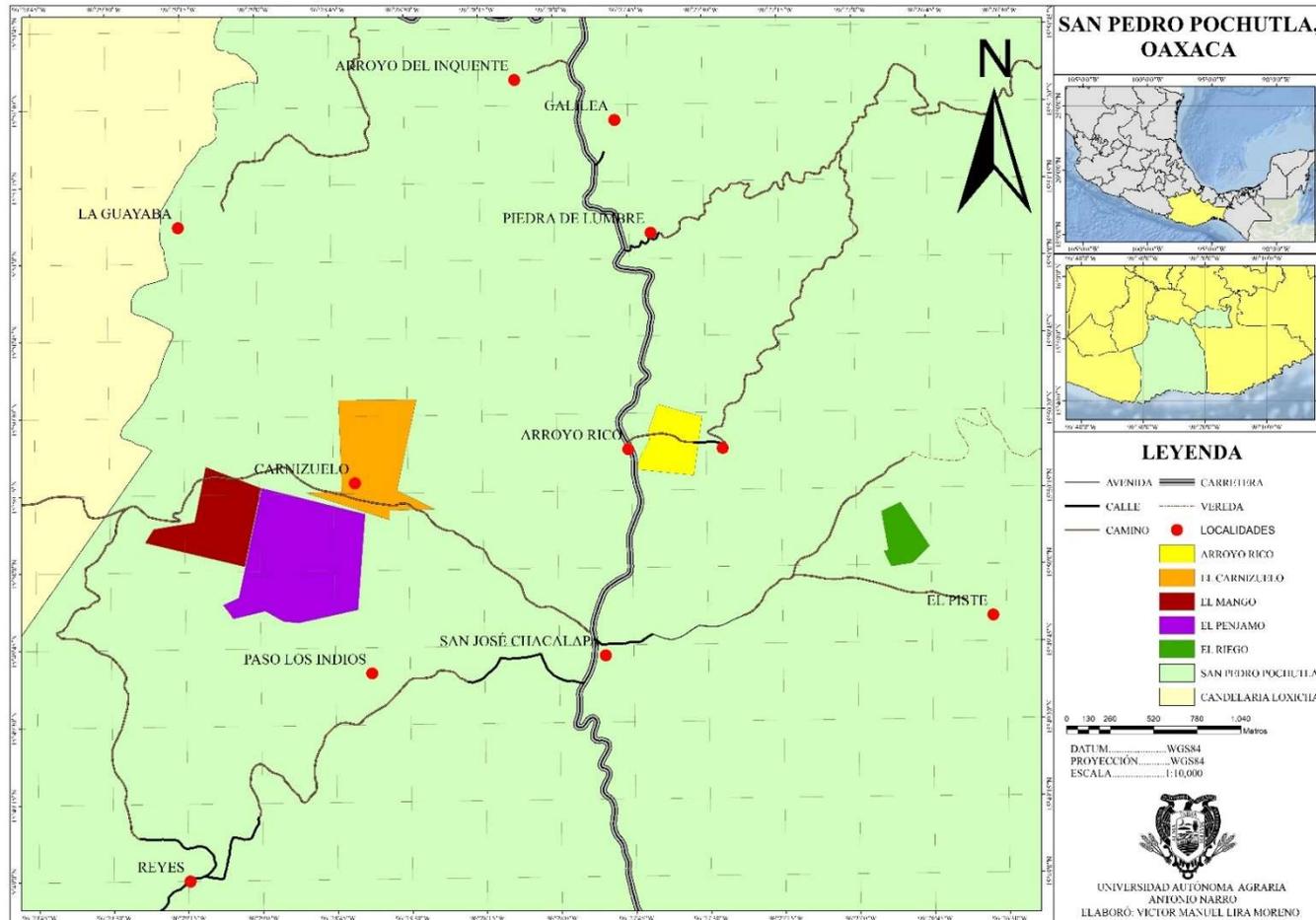


Figura 1. Localización geográfica de las plantaciones forestales comerciales con enriquecimiento de achual de *Cedrela odorata* L. en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

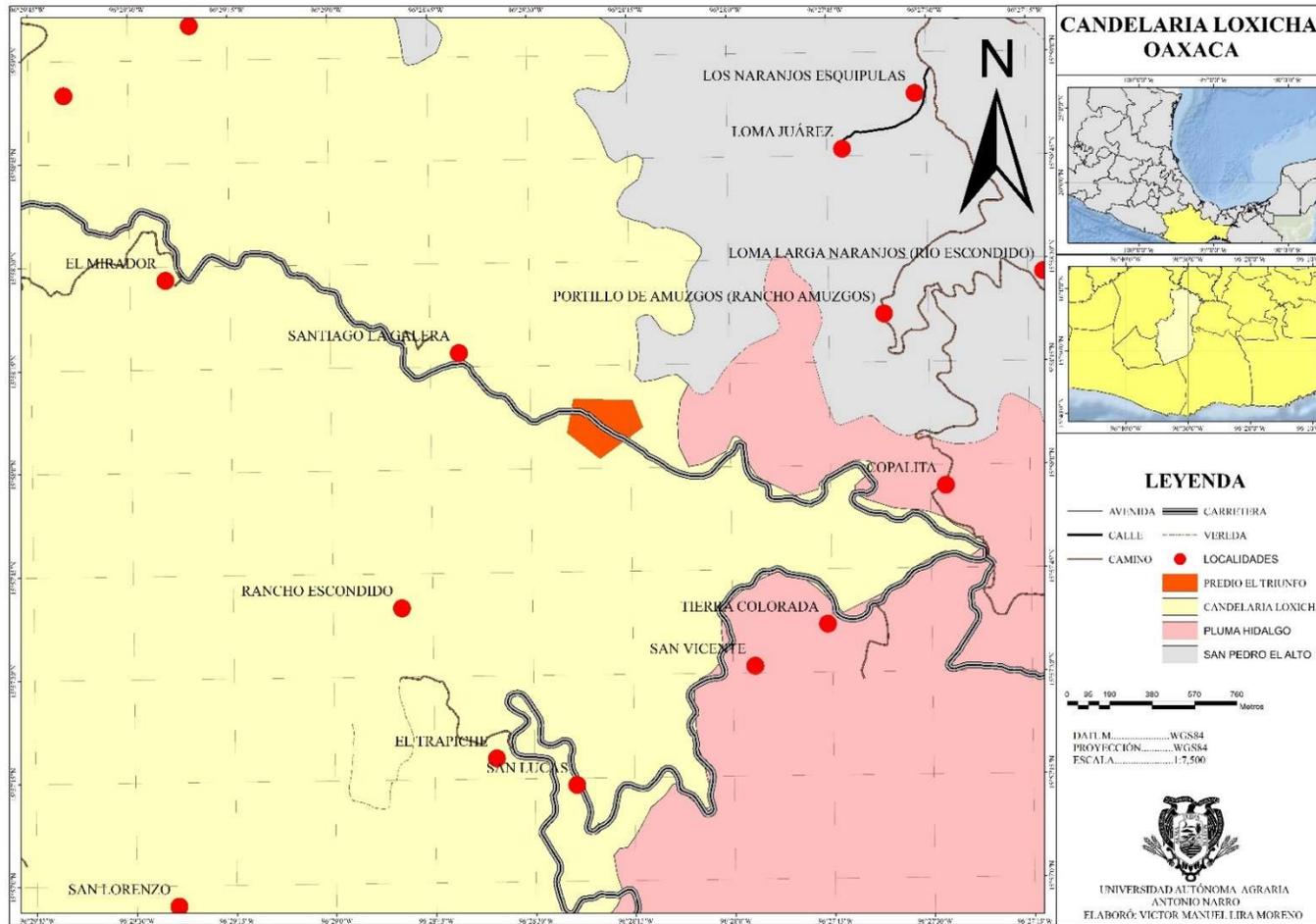


Figura 2. Localización geográfica de las plantaciones forestales comerciales con enriquecimiento de acahual de *Cedrela odorata* L. en Santiago La Galera, Candelaria Loxicha, Pochutla, Oaxaca.

Cuadro 5. Aspectos ecológicos de la plantación en San Pedro Pochutla, Oaxaca.

| Localización de área de estudio        | Predio  | Fisiografía  | Orografía  | Hidrología   | Geología   | Edafología                        | Clima                  |
|--|---|--|--|--|--|-----------------------------------|------------------------|
| San José Chacalapa, San Pedro Pochutla | El Pénjamo”<br>“El Carnizuelo”<br>“El Mango”<br>“Arroyo Rico”<br>“El Riego” | Provincia:<br>Sierra Madre Sur<br>Sub-provincia:<br>Costas del Sur               | Altitud: 200<br>a 400 msnm<br>Pendientes:<br>< 40% | RH-21<br>de Oaxaca<br>(Puerto Ángel), en la<br>cuenca C<br>Copalita y en | JtKbe(?)Sv:<br>Volcano<br>Sedimentario<br>ToGd:<br>C<br>Granodiorita | Regosol Eútrico<br>Feozem Háptico | AW <sub>o</sub> (W)igw |
| Santiago Galera, Candelaria Loxicha    | La “El Triunfo”   | Provincia:<br>Sierra Madre Sur<br>Sub-provincia:<br>Cordillera<br>Costera de Sur | Altitud:<br>1190 msnm<br>Pendientes:<br>70% a 85%  | la subcuenca<br>C del rio<br>Tonameca                                    | pTmCM:<br>Complejo<br>Metamórfico                                    | Luvisol<br>Crómico                | A(c)m(w)igw            |

### **3.4 Diseño de muestreo y establecimiento de sitios permanentes**

En marzo de 2008 se establecieron de los sitios permanentes (Apéndice 2) considerando un diseño de muestreo sistemático, para el establecimiento del primer sitio fue aleatoriamente, con el cual se definió la distribución de los siguientes sitios, fue con una intensidad de muestreo de 0.5%, por lo tanto, quedaron a una distancia de 140 m de forma uniforme. Se empleó una forma de sitio de forma circular de 250 m<sup>2</sup> y un radio de 8.92 m (Sandoval, 2010).

Se establecieron un total de un total de 31 sitios permanentes, los cuales están distribuidos en los predios “El Pénjamo”, “El Carnizuelo”, “El Mango”, “Arroyo Rico” y “El Riego” y “El Triunfo”, se colocó un placa metálica en la base del árbol del centro del sitio, la cual indica el número del sitio y el predio al que pertenece, cada sitio fue georreferenciado, además los árboles que se encontraron dentro del sitio fueron marcados y numerados con pintura a la altura del pecho con la finalidad de facilitar su localización y evaluación en mediciones posteriores (Sandoval, 2010). Las plantaciones han sido evaluadas en los años 2010, 2011, 2012, 2014, 2017 y por último en 2021.

### **3.5 Variables dasométricas**

Las variables evaluadas han sido: altura total del árbol, diámetro a 1.30 m. para lo cual se requirió de los siguientes materiales; una cinta diamétrica para medir los diámetros, una pistola Haga para medir la altura total y un flexómetro para tomar la altura a los árboles pequeños, una cuerda compensada para delimitación del sitio y un GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para las georreferenciaciones de los sitios. La variable de volumen total se obtuvo en base a la tabla de volúmenes para *Cedrela odorata* L. en San José Chacalapa Pochutla, Oaxaca, con ayuda de la ecuación expresada por (Hernández, 2013):

$$VT = Exp^{(-73165+3.2288 \log_{10}(D)+2.1332 \log_{10}(H))}$$

Donde:

VT= Volumen Total

H= Altura Total

D= Diámetro normal

Log<sub>10</sub>= Logaritmo en base 10

### 3.6 Modelos de crecimiento

Para la predicción de crecimiento e índices de sitio para árboles de especies tropicales y especies templadas, los modelos de tipo sigmooidal de tipo no lineal más utilizados en México son: Weibull, Schumacher, Gompertz y Logístico (Aguilar, 1991; García *et al.*, 2007).

Modelos para el análisis de las variables: diámetro normal, altura total, área basal y volumen total (Cuadro 6).

Para poder validar un modelo de crecimiento que es de regresión no lineal es necesario considerar los criterios de; Cuadrados Medios Error (CME); Coeficiente de determinación ( $R^2$ ); y Coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  adj) (Sit y Poulin-Costello 1994).

### 3.7 Determinación de turno absoluto

Para obtener el turno absoluto, se corrieron los 8 modelos (Cuadro 5), donde se eligió el modelo que mejor se ajustó a los datos observados, posteriormente se calculó Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA), con el modelos mejor ajustado se sustituyen los valores de los parámetros de la regresión no lineal donde se obtienen los valores predichos para cada una de las variables (altura total, diámetro normal, área basal, volumen total), posteriormente se grafican los valores de ICA e IMA calculados de acuerdo

al modelo que mejor se ajuste para cada variable, por lo que la intersección de las líneas correspondientes del ICA e IMA de la cual se obtiene el turno absoluto.

### **3.8 Determinación del Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA)**

Imaña y Encinas (2008) y Gual *et al.*, (2019) indican que el incremento se puede definir como el crecimiento de un árbol o bien de un rodal en un determinado tiempo con las variables dasométricas, por consiguiente, nos dan las siguientes ecuaciones:

$$ICA = Y_{(t+1)} - Y_{(t)}$$

Donde:

ICA = Incremento Medio Anual

Y = Dimensión de la variable considerada

t = Edad

$$IMA = Y_t/t_o$$

Donde:

IMA = Incremento Medio Anual

t<sub>o</sub> = Edad a partir del tiempo cero

Y = Dimensión de la variable considerada

### **3.9 Determinación de turno técnicos**

Para la determinación del turno técnico se consultó a expertos que han trabajado con especies preciosas como cedro rojo (*Cedrela odorata* L.), a partir de los usos que se le da a la madera, para determinar una medida comercial (Hernández, 2012). Otro criterio son los diámetros mínimos de corta en áreas de distribución natural; en plantaciones forestales comerciales se debe esperar el turno absoluto o en su caso el turno técnico, por lo que en cedro rojo se

comercializa la madera color rojizo con su olor característico por la alta concentración de taninos.

Coronel (2017) nos dice que en el turno técnico ha y una relación de producción y la edad de la plantación forestal comercial se determina de la siguiente manera:

$$Q = f(t)$$

Donde:

Q= Producción forestal (m<sup>3</sup>)

t= Edad de la plantación

Cuadro 6. Modelos de crecimiento para la estimación de altura, diámetro, área basal y volumen para la plantación a 25 años de establecida.

| Nombre del modelo                                | Ecuación                                |
|--|---|
| 1. Chapman-Richard                               | $y = a(1 - e^{-(bx)^c})$                |
| 2. Von Bertalanffy                               | $y = a(1 - e^{-bx})^3$                  |
| 3. Gompertz                                      | $y = ae^{-be^{-cx}}$                    |
| 4. Sloboda                                       | $y = ae^{-be^{-cx^d}}$                  |
| 5. Schumacher                                    | $y = ae^{-\frac{b}{x}}$                 |
| 6. Weibull                                       | $y = a(1 - (e^{-(bx^c)}))$              |
| 7. Schumacher modificado por<br>Bailey & Clutter | $y = e^{(a - (\frac{b}{x^c}))}$         |
| 8. Hossfeld III                                  | $y = \frac{x}{(a + b * \ln(x) + c(x))}$ |

Dónde: y=variable de estudio; a, b, c, d= parámetros de regresión; x= edad; e= base de logaritmos de naturales.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Ajuste de modelos de crecimiento

#### 4.1.1 Crecimiento en altura

En la variable altura total en la especie de *Cedrela odorata* L., se examinaron los ocho modelos de crecimiento (Cuadro 7), donde se observa que el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter, al igual que Weibull, tiene valores similares en el ajuste, sin embargo se eligió el modelos de Schumacher modificado por Bailey y Clutter, porque obtuvo un mejor ajuste con una  $R^2_{adj}$  de 0.9024, y su CME de 20.7475; por otra parte tiene menor complejidad en su utilización (Cruz, 2013; Ruiz, 2015; Avendaño, 2018; Velázquez, 2018), además es un modelos que se pueden linealizar los parámetros para mayor practicidad. Dicho modelo seleccionado se ha usado para estimar curvas de índice de sitio en *Pinus radiata* D. Don (Bailey y Clutter, 1974), y en la especie de *Vochysia guatemalensis* (Mora *et al*, 2019), también se ha utilizado en parcelas permanentes o en análisis troncales en especies tropicales como (*Tectona grandis* Linn) (Mora y Meza, 2003).

Es importante señalar que también el modelo de Chapman-Richards, Von Bertalanffy y Hossfeld III fueron los modelos que también tuvieron un buen ajuste en base a los criterios estadísticos para altura total en *Cedrela odorata* L.

La curva de crecimiento se modeló con el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter, se comportó de la siguiente manera (Figura 3), su comportamiento de la curva no es normal para una especie arbórea ya que no tiene una forma de “S” o también conocida como sigmoidal, de acuerdo al comportamiento de la curva es así ya que cuenta con unos valores altos los primeros en evaluaciones pasadas y no se tienen valores de los primeros seis años de la plantación ya que la primera evaluación se realizó cuando tenía siete años la plantación,

por lo que la curva muestra la forma de exponencial invertida, después del año cinco, a los 25 años la pendiente es alta, por lo que es ascendente, por ello se debe el compartimento de las curvas de ICA e IMA en la variable altura total.

Cuadro 7. Modelos de crecimiento utilizados para la variable altura total de *Cedrela odorata* L. en plantación de enriquecimiento de acahual en Pochutla Oaxaca.

| Tipo de Ecuación | Modelo  | Parámetros | Estimación  | R2     | R2 adj | CME     | RCME   | Pr > F |
|------------------|---|------------|-------------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Altura Total     | Modelo Chapman-Richards                           | a          | 36.9809     | 0.9025 | 0.9023 | 20.7551 | 4.5558 | <.0001 |
|                  |   | b          | 0.3478      |        |        |         |        |        |
|                  |   | c          | 0.1000      |        |        |         |        |        |
|                  | Modelo Von Bertalanffy                            | a          | 36.9809     | 0.9025 | 0.9023 | 20.7551 | 4.5558 | <.0001 |
|                  |   | b          | 0.0116      |        |        |         |        |        |
|                  | Modelo Gompertz                                   | a          | 29.8449     | 0.9025 | 0.9023 | 20.7675 | 4.5571 | <.0001 |
|                  |   | b          | 2.1814      |        |        |         |        |        |
|                  |   | c          | 0.0766      |        |        |         |        |        |
|                  | Modelo Sloboda                                    | a          | 29.8449     | 0.9025 | 0.9023 | 20.7675 | 4.5571 | <.0001 |
|                  |   | b          | 2.1814      |        |        |         |        |        |
|                  |   | c          | 0.3828      |        |        |         |        |        |
|                  | Modelo Schumacher                                 | a          | 29.8678     | 0.9010 | 0.9009 | 21.0635 | 4.5895 | <.0001 |
|                  |   | b          | 9.9592      |        |        |         |        |        |
|                  | Modelo Weibull                                    | a          | 13604594    | 0.9025 | 0.9024 | 20.7476 | 4.5550 | <.0001 |
|                  |   | b          | 0.000000137 |        |        |         |        |        |
|                  |   | c          | 0.7670      |        |        |         |        |        |
|                  | Modelo Schumacher modificado por Bailey y Clutter | a          | 357         | 0.9025 | 0.9024 | 20.7475 | 4.5549 | <.0001 |
|                  |   | b          | 356.4       |        |        |         |        |        |
|                  |   | c          | 0.00216     |        |        |         |        |        |
|                  | Modelo Hossfeld III                               | a          | 0.5965      | 0.9025 | 0.9023 | 20.7624 | 4.5566 | <.0001 |
|                  |   | b          | 0.0999      |        |        |         |        |        |
| c                |   | 0.00917    |             |        |        |         |        |        |

R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación, R<sup>2</sup>adj=coeficiente de determinación ajustado CME=cuadrado medio del error y a, b, c, d = parámetros de modelo. Nota: El modelo seleccionado se presenta con el sombreado gris más oscuro y los modelos sombreados con gris claro son los que tuvieron también mejor ajuste.

Se analizó el crecimiento de plantaciones forestales comerciales con enriquecimiento de acahual en la variable de altura total, se compararon diferentes estudios realizados con antelación en la región de Pochutla, Oaxaca el trabajo realizado por Quintero (2005), en la

variable de altura total el mejor modelo que se ajustó fue Von Bertalanffy el cual presentó un  $R^2$  adj de 0.7564 y un CME de 2.5571, este fue el primer trabajo que se realizó en el área de estudio. En el caso de Galán (2007), el mejor modelo fue de Chapman-Richards con los valores de  $R^2$  de 0.9190 y CME de 1.7463. Sin embargo, para Sandoval (2010), se ajustó más el modelo Weibull para altura promedio, los valores de  $R^2$  adj de 0.9475 y CME de 3.033. En el caso de Santiago (2012), el mejor modelo ajustado para altura promedio fue el modelo de Chapman-Richards con valores de  $R^2$  adj de 0.9563 y CME de 4.8970. En cambio, Cruz (2013) encontró que el que mejor se ajustó fue el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter con valores de  $R^2$  adj de 0.9560 y CME de 5.3049. Con Ruiz (2015), se ajustó el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter con valores de  $R^2$  adj de 0.9379 y CME de 12.5771. También Avendaño (2018), se ajustó el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter con valores de  $R^2$  adj de 0.9112 y CME de 19.3393. Nuevamente con Velázquez (2018), se ajustó el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter con valores de  $R^2$  adj de 0.9028 y CME de 20.6314.

Mientras que, para el presente estudio se ajusta el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter al igual que estudios anteriores.

#### 4.1.2 Crecimiento en diámetro normal

Para la variable diámetro normal en la especie de *Cedrela odorata* L., se ajustaron los ocho modelos de crecimiento (Cuadro 8) donde se observa que el modelo de Gompertz al igual que Sloboda, los valores son similares, sin embargo, se eligió el modelo Gompertz, ya que los valores obtenidos de  $R^2$ adj fue de 0.8888, y su CME fue de 45.4127, por ende, el modelo seleccionado ya que presenta menos parámetros. Por lo que si un modelo presenta menos número de parámetros es menos complicado encontrar los valores de los parámetros (Gujarati y Porter, 2010), y se facilita encontrar convergencia en el modelo (Sit y Poulin-Costello 1994). Por otra parte, los modelos de Schumacher y Hossfeld III tuvieron valores en los estadísticos de ajuste cercanos a los modelos mencionados.

La curva de crecimiento del modelo de Gompertz se comportó como se muestra en la (Figura 4), el comportamiento de la curva es exponencial en forma “S” o también conocida como

sigmoïdal, que como de manera común se comporta un especie arbórea, de acuerdo al comportamiento de la curva es así ya que cuenta con unos valores altos los primeros en evaluaciones pasadas y no se tienen valores de los primeros seis años de la plantación ya que la primera evaluación se hizo cuando tenía siete años la plantación, por ello sobre estima los valores estimados los primero años.

Cuadro 8. Modelos de crecimiento utilizados para la variable diámetro normal de *Cedrela odorata* L. en plantación de enriquecimiento de acahual en Pochutla Oaxaca.

| Tipo de Ecuación    | Modelo  | Parámetros | Estimación  | R2     | R2 adj  | CME     | RCME   | Pr > F |
|---------------------|---|------------|-------------|--------|---------|---------|--------|--------|
| Diámetro normal     | Modelo Chapman-Richards                           | a          | 49.602      | 0.8884 | 0.8881  | 45.6594 | 6.7572 | <.0001 |
|                     |   | b          | 0.3595      |        |         |         |        |        |
|                     |   | c          | 0.1000      |        |         |         |        |        |
|                     | Modelo Von Bertalanffy                            | a          | 49.6007     | 0.8884 | 0.8881  | 45.6594 | 6.7572 | <.0001 |
|                     |   | b          | 0.0120      |        |         |         |        |        |
|                     | Modelo Gompertz                                   | a          | 30.3553     | 0.8891 | 0.8888  | 45.4127 | 6.7389 | <.0001 |
|                     |   | b          | 2.9022      |        |         |         |        |        |
|                     |   | c          | 0.1395      |        |         |         |        |        |
|                     | Modelo Sloboda                                    | a          | 30.3553     | 0.8891 | 0.8888  | 45.4127 | 6.7389 | <.0001 |
|                     |   | b          | 2.9022      |        |         |         |        |        |
|                     |   | c          | 0.6973      |        |         |         |        |        |
|                     |   | d          | 0.2000      |        |         |         |        |        |
|                     | Modelo Schumacher                                 | a          | 42.3336     | 0.8889 | 0.8887  | 45.452  | 6.7418 | <.0001 |
|                     |   | b          | 10.371      |        |         |         |        |        |
|                     | Modelo Weibull                                    | a          | 18260597    | 0.8876 | 0.8874  | 45.96   | 6.7794 | <.0001 |
|                     |   | b          | 0.000000137 |        |         |         |        |        |
|                     |   | c          | 0.7758      |        |         |         |        |        |
|                     | Modelo Schumacher modificado por Bailey y Clutter | a          | 357.3       | 0.8876 | 0.8874  | 45.9571 | 6.7792 | <.0001 |
| b                   |   | 356.4      |             |        |         |         |        |        |
| c                   |   | 0.00219    |             |        |         |         |        |        |
| Modelo Hossfeld III | a   | 1.1890     | 0.8890      | 0.8887 | 45.4291 | 6.7401  | <.0001 |        |
|                     | b   | -0.3918    |             |        |         |         |        |        |
|                     | c   | 0.0387     |             |        |         |         |        |        |

R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación, R<sup>2</sup>adj=coeficiente de determinación ajustado CME=cuadrado medio del error y a, b, c, d = parámetros de modelo. Nota: El modelo seleccionado se presenta con el sombreado gris más oscuro y los modelos sombreados con gris claro son los que tuvieron también mejor ajuste.

En el caso de la variable de diámetro normal (1.30m), se compararon diferentes estudios realizados con antelación en la misma área de estudio. Para lo cual, Quintero (2005), en la variable de diámetro a la base a 0.30m con mejor ajuste fue el modelo Von Bertalanffy con  $R^2$  adj de 0.7013 y un CME de 9.1421. En el caso de Sandoval (2010), se ajustó más el modelo Weibull para altura promedio, con los valores de  $R^2$  adj de 0.9241 y CME de 8.3750. Con Santiago (2012), se ajustó el modelo para altura promedio fue el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter con valores de  $R^2$  adj de 0.9214 y CME de 17.6918. En cambio, Cruz (2013) se ajustó el modelo de Weibull con  $R^2$  adj de 0.9195 y CME de 20.4432. También Ruiz (2015) se ajustó el modelo de Weibull con valores de  $R^2$  adj de 0.9170 y CME de 30.2262. Sin embargo, para Avendaño (2018) se ajustó el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter con valores de  $R^2$  adj de 0.8771 y CME de 43.5064. También Velázquez (2018) se ajustó el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter con valores de  $R^2$  adj de 0.8748 y CME de 47.8253.

#### 4.1.3 Crecimiento en área basal

En la variable área basal se observó que el modelo de Schumacher, Schumacher modificado por Bailey y Clutter, Gompertz y Sloboda (Cuadro 9), son los que obtuvieron un mejor ajuste con valores de  $R^2$  adj de 0.6903, y su CME de 0.000571. Por lo que se seleccionó el modelo de Schumacher considerando los criterios de linealización del modelo y número de parámetros.

De acuerdo con Alder (1980), la ecuación de Schumacher se puede linealizar por cuestiones de practicidad, por lo que se ha aplicado en el ajuste de curvas de índice de sitio. Sin embargo, si un modelo cuenta con varios parámetros es muy difícil encontrar convergencia (Sit y Poulin-Costello 1994; Garrido-García, 2015), además se vuelve tedioso y pesado para encontrar los valores de los parámetros (Gujarati y Porter, 2010).

La curva de crecimiento del modelo de Schumacher se comportó como se muestra en la (Figura 5), su comportamiento de la curva es exponencial en forma normal como se comporta una especie arbórea en forma de “S” o también conocida como sigmoideal, por lo tanto, aún

está en crecimiento, pero ya empieza a estabilizarse partir del año 23 de establecida la plantación.

Cuadro 9. Modelos de crecimiento utilizados para la variable área basal de *Cedrela odorata* L. en plantación de enriquecimiento de acahual en Pochutla Oaxaca.

| Tipo de Ecuación    | Modelo  | Parámetros | Estimación | R2     | R2 adj   | CME      | RCME   | Pr > F |
|---------------------|---|------------|------------|--------|----------|----------|--------|--------|
| Área Basal          | Modelo Chapman-Richards                           | a          | -0.0502    | 0.6864 | 0.6860   | 0.000579 | 0.0241 | <.0001 |
|                     |   | b          | 0.0366     |        |          |          |        |        |
|                     |   | c          | -1.0000    |        |          |          |        |        |
|                     | Modelo Von Bertalanffy                            | a          | -0.0501    | 0.6864 | 0.6860   | 0.000579 | 0.0241 | <.0001 |
|                     |   | b          | -0.0122    |        |          |          |        |        |
|                     | Modelo Gompertz                                   | a          | 0.0814     | 0.6909 | 0.6903   | 0.000571 | 0.0239 | <.0001 |
|                     |   | b          | 5.2037     |        |          |          |        |        |
|                     |   | c          | 0.1311     |        |          |          |        |        |
|                     | Modelo Sloboda                                    | a          | 0.0814     | 0.6909 | 0.6903   | 0.000571 | 0.0239 | <.0001 |
|                     |   | b          | 5.2037     |        |          |          |        |        |
|                     |   | c          | 0.6557     |        |          |          |        |        |
|                     |   | d          | 0.2000     |        |          |          |        |        |
|                     | Modelo Schumacher                                 | a          | 0.1500     | 0.6909 | 0.6903   | 0.000571 | 0.0239 | <.0001 |
|                     |   | b          | 20.0023    |        |          |          |        |        |
|                     | Modelo Weibull                                    | a          | 0.0771     | 0.6908 | 0.6898   | 0.000572 | 0.0239 | <.0001 |
|                     |   | b          | 0.00247    |        |          |          |        |        |
|                     |   | c          | 2.0885     |        |          |          |        |        |
|                     | Modelo Schumacher modificado por Bailey y Clutter | a          | -1.6928    | 0.6910 | 0.6903   | 0.000571 | 0.0239 | <.0001 |
| b                   |   | 16.3215    |            |        |          |          |        |        |
| c                   |   | 0.8705     |            |        |          |          |        |        |
| Modelo Hossfeld III | a   | 1747.2     | 0.6907     | 0.6898 | 0.000572 | 0.0239   | <.0001 |        |
|                     | b   | -692.1     |            |        |          |          |        |        |
|                     | c   | 34.147     |            |        |          |          |        |        |

R<sup>2</sup>=coeficiente de determinación, R<sup>2</sup>adj=coeficiente de determinación ajustado CME=cuadrado medio del error y a, b, c, d = parámetros de modelo. Nota: El modelo seleccionado se presenta con el sombreado gris más oscuro y los modelos sombreados con gris claro son los que tuvieron también mejor ajuste.

En la variable de área basal se compararon estudios realizados anteriormente en la plantación con enriquecimiento de acahuals en Pochutla, Oaxaca para Quintero (2005), en la variable de área basal a 0.30m el modelo que mejor ajustó fue Gompertz el cual presento una R<sup>2</sup> adj de 0.6310 y un CME de 0.00003. En el caso de Cruz (2013) se ajustó el modelo de

Schumacher modificado por Bailey y Clutter con valores de  $R^2$  adj de 0.7563 y CME de 0.000181, en cambio en el trabajo de Ruiz (2015) se ajustó el modelo de Weibull con valores de  $R^2$  adj de 0.7193 y CME de 0.000384. También Avendaño (2018) se ajustó el modelo de Weibull con valores de  $R^2$  adj de 0.6652 y CME de 0.000556. Nuevamente con Velázquez (2018) se ajustó el modelo de Weibull con valores de  $R^2$  adj de 0.6715 y CME de 0.0005.

#### 4.1.4 Crecimiento en volumen

En la variable volumen total los modelos de crecimiento de Schumacher modificado por Bailey y Clutter, Weibull, Gompertz, Sloboda y Hossfeld III (Cuadro 10), son los que obtuvieron el mejor ajuste con valores de  $R^2$  adj de 0.6863, y CME de 0.1803, de dichos modelos se seleccionó el modelo de Weibull, ya que es un modelo que se puede linealizar (Valera-Rivera, 2020). Además, en el estudio con antelación por Ruiz (2015) se ajustó el modelo de Weibull en una plantación con enriquecimiento de acahual.

Sin embargo, Bailey y Clutter (1974) señalan que, se puede linealizar el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter; por su parte Valera-Rivera (2020) menciona que, se pueden linealizar el modelo de Gompertz; Alberdi *et al.*, (2013) indica que el modelo de Hossfeld se ha seleccionado por simplicidad y por ser un modelo mixto no lineal que se ha usado para ajustar distribuciones diamétricas en pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.); Finalmente a Contreras (2021), se ajustó el modelo de Hossfeld III, en una plantación con enriquecimiento de acahual.

La curva de crecimiento del modelo de Weibull se comportó de la siguiente manera como se muestra en la (Figura 6), su comportamiento de la curva es exponencial en forma “J” lo que indica que aún está en crecimiento la especie, por consecuencia aún no se llega a un punto de inflexión entre las curvas de ICA e IMA.

Para la variable de volumen total, los estudios realizados en esta plantación de San José Chacalapa, para Galán (2007), el modelo de mejor ajuste fue el de Schumacher y Hall con valores de  $R^2$  de 0.9946 y CME de 0.000022; en cambio para, Ruiz (2015), se ajustó el

modelo de Weibull con valores de  $R^2$  adj de 0.7214 y CME de 0.1108; en el caso de Contreras (2021), se ajustó el modelo de Hossfeld III con valores de  $R^2$  adj de 0.9160 y CME de 0.0177.

Cuadro 10. Modelos de crecimiento utilizados para la variable volumen total de *Cedrela odorata* L. en plantación de enriquecimiento de acahual en Pochutla Oaxaca.

| Tipo de Ecuación    | Modelo  | Parámetros | Estimación | R2     | R2 adj | CME    | RCME   | Pr > F |
|---------------------|---|------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Volumen Total       | Modelo Chapman-Richards                           | a          | -0.4406    | 0.6834 | 0.6830 | 0.1822 | 0.4268 | <.0001 |
|                     |   | b          | 0.0118     |        |        |        |        |        |
|                     |   | c          | -5.0000    |        |        |        |        |        |
|                     | Modelo Von Bertalanffy                            | a          | -0.4406    | 0.6834 | 0.6830 | 0.1822 | 0.4268 | <.0001 |
|                     |   | b          | -0.0196    |        |        |        |        |        |
|                     | Modelo Gompertz                                   | a          | 2.0916     | 0.6871 | 0.6863 | 0.1803 | 0.4246 | <.0001 |
|                     |   | b          | 5.078      |        |        |        |        |        |
|                     |   | c          | 0.0984     |        |        |        |        |        |
|                     | Modelo Sloboda                                    | a          | 2.0916     | 0.6871 | 0.6863 | 0.1803 | 0.4246 | <.0001 |
|                     |   | b          | 5.078      |        |        |        |        |        |
|                     |   | c          | 1.574      |        |        |        |        |        |
|                     |   | d          | 0.0625     |        |        |        |        |        |
|                     | Modelo Schumacher                                 | a          | 3.4098     | 0.6860 | 0.6854 | 0.1808 | 0.4252 | <.0001 |
|                     |   | b          | 24.1916    |        |        |        |        |        |
|                     | Modelo Weibull                                    | a          | 1.9785     | 0.6872 | 0.6863 | 0.1803 | 0.4246 | <.0001 |
|                     |   | b          | 0.00146    |        |        |        |        |        |
|                     |   | c          | 2.0754     |        |        |        |        |        |
|                     | Modelo Schumacher modificado por Bailey y Clutter | a          | 2.9732     | 0.6871 | 0.6863 | 0.1803 | 0.4246 | <.0001 |
| b                   |   | 12.4073    |            |        |        |        |        |        |
| c                   |   | 0.4788     |            |        |        |        |        |        |
| Modelo Hossfeld III | a   | 113.5      | 0.6871     | 0.6863 | 0.1803 | 0.4246 | <.0001 |        |
|                     | b   | -43.106    |            |        |        |        |        |        |
|                     | c   | 1.7485     |            |        |        |        |        |        |

$R^2$ =coeficiente de determinación,  $R^2$ adj=coeficiente de determinación ajustado CME=cuadrado medio del error y a, b, c, d = parámetros de modelo. Nota: El modelo seleccionado se presenta con el sombreado gris más oscuro y los modelos sombreados con gris claro son los que tuvieron también mejor ajuste.

## 4.2 Determinación del turno absoluto

### 4.2.1 Estimación de incremento y de turno absoluto en altura total

El comportamiento del ICA e IMA para la variable altura total (Figura 3). Se observa que el ICA de la plantación alcanza un máximo crecimiento en el año uno al igual que el IMA con un valor de 1.8221 (m/año), posteriormente del año 2 a los 25 el IMA es mayor que el ICA por ende a partir del año dos empieza a decrecer y se vuelven curvas paralelas, esto hasta cuando no tenemos mediciones de los primeros siete años de los individuos que se evalúan en los sitios permanentes. Por lo tanto, aun no llega a un punto de inflexión y aún no hay turno absoluto, además, en este punto debemos considerar que *Cedrela odorata* L. es una especie heliófila.

En estudios realizados en la zona de Pochutla, Oaxaca. Donde Sandoval (2010), encontró una intersección entre el ICA e IMA lo que indica que hay un turno absoluto en altura, en cual se presenta a principios de año ocho; por otra parte en el trabajo de Santiago (2012), se encontró una intersección entre el ICA e IMA, y se intercepta en año 5.4, lo cual indica que hay un turno absoluto; Ruiz (2015), encontró una intersección, en la gráfica de ICA e IMA la cual fue a los siete años y medio; y finalmente Avendaño (2018), en su grafica de ICA en IMA se observa la intersección entre ambas curvas a una edad de cuatro años.

### 4.2.2 Estimación de incremento y de turno absoluto en diámetro normal

El comportamiento del ICA e IMA para la variable diámetro normal (Figura 4) podemos observar que el IMA se disparó alcanzando un máximo crecimiento en el año 1 con valor de 1.6891 (cm/año), por consecuencia partir del año dos empieza a decrecer. En el ICA en el año ocho llega a su valor máximo con 1.5562 (cm/año), por lo tanto, en la (Figura 4) en la gráfica inferior podemos observar que se cuentan con dos intercesiones, por lo tanto, para obtener turno absoluto se toma el punto de inflexión más alto, ya que aún hubo crecimiento después del punto de intersección uno, por lo que *Cedrela odorata* L. en una plantación de

enriquecimiento de acahuales el turno absoluto en diámetro llega a los 10.7 años de establecida.

En estudios realizados en el área, como el de Sandoval (2010), encontró una intersección entre el ICA e IMA lo que nos indica que hay un turno absoluto en altura en cual se presenta durante el año nueve; Santiago (2012) se reportó una intersección en la gráfica de ICA e IMA para diámetro normal, lo que indica que se encuentra un turno absoluto antes del año 11; por su parte Ruiz (2015), en su curva de ICA e IMA observó una intersección en el año nueve y seis meses, el cual se obtiene el turno absoluto (máximo); finalmente Avendaño (2018), obtuvo un punto de intersección con las curvas de ICA e IMA a una edad cuatro años y dos meses, por lo tanto, ahí es donde se obtiene el turno absoluto.

#### 4.2.3 Estimación de incremento y de turno absoluto en área basal

El comportamiento del ICA e IMA para la variable área basal (Figura 5) se observó que el ICA alcanza un máximo crecimiento a los 11 años con un valor de 0.00405 (m<sup>2</sup>/año), posterior empieza a decrecer; mientras que el valor máximo de IMA fue de 0.00276 (m<sup>2</sup>/año) a los 19 años, por lo que el mismo valor se mantuvo en el año 20 y 21, después empezó a decrecer, por lo que se encuentra un punto de inflexión, lo que indica que ahí se encuentra el turno absoluto a la edad de 20.5 años de establecida la plantación.

Por otra parte, en estudios realizados como el de Ruiz (2015), se encontró en un ICA máximo en los primeros años, manteniéndose hasta el año 11, el IMA su máximo crecimiento fue, en el año 14 y 8 meses, donde también fue la intersección para obtener el turno absoluto máximo; Avendaño (2018), en sus curvas de ICA e IMA se obtuvo una intersección entre curvas a los 17 años y 10 meses, lo que es el turno absoluto.

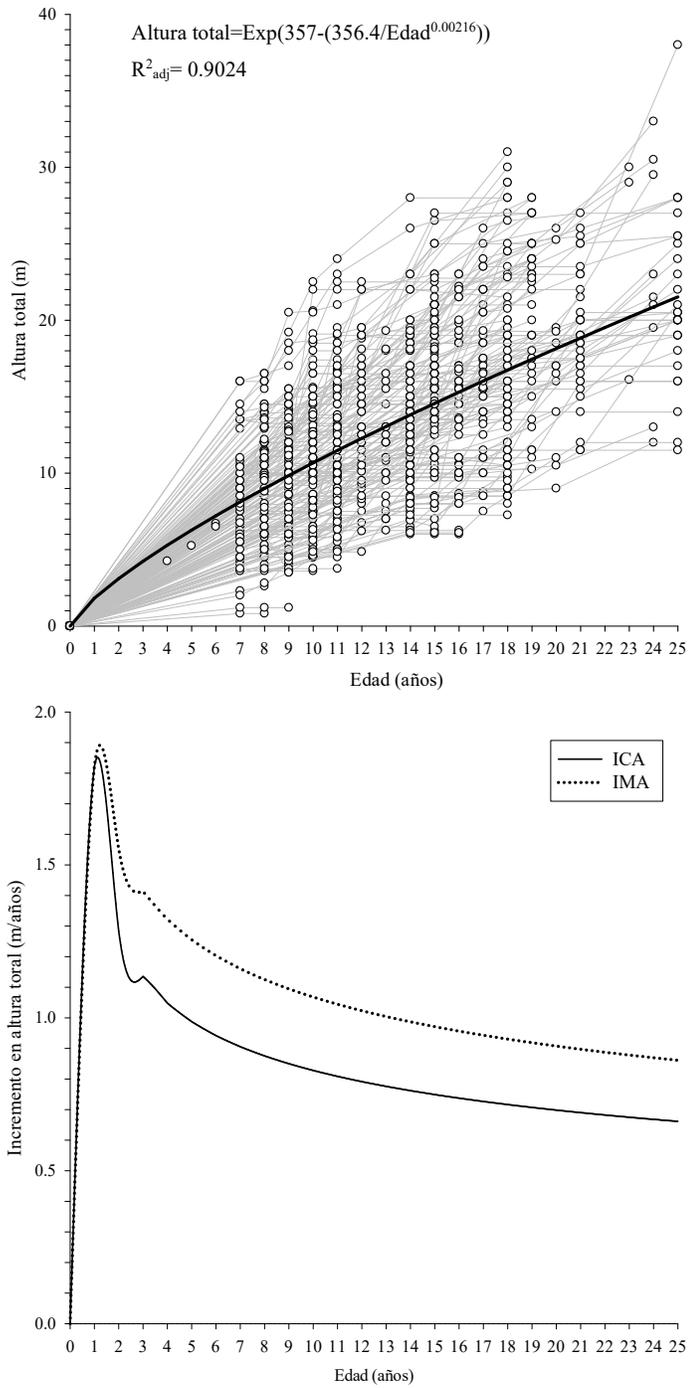


Figura 3. Diagrama de dispersión de datos observados en campo, con una curva de ajuste del modelo mejor ajustado para la variable altura total (grafica superior) y curvas de ICA e IMA en relación a los estimados del modelo mejor ajustado (grafica inferior).

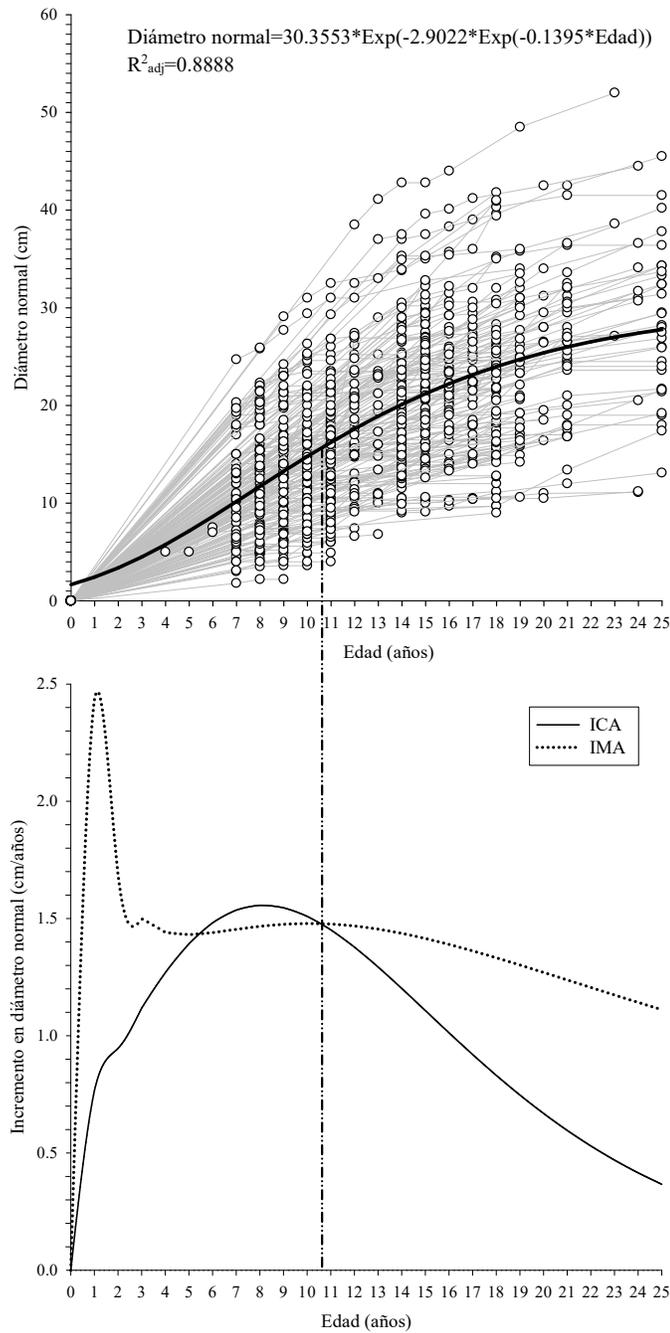


Figura 4. Diagrama de dispersión de datos observados en campo, con una curva de ajuste del modelo mejor ajustado para la variable diámetro normal (grafica superior) y curvas de ICA e IMA en relación a los estimados del modelo mejor ajustado (grafica inferior). La línea punteada representa el turno absoluto donde es la intersección del ICA e IMA.

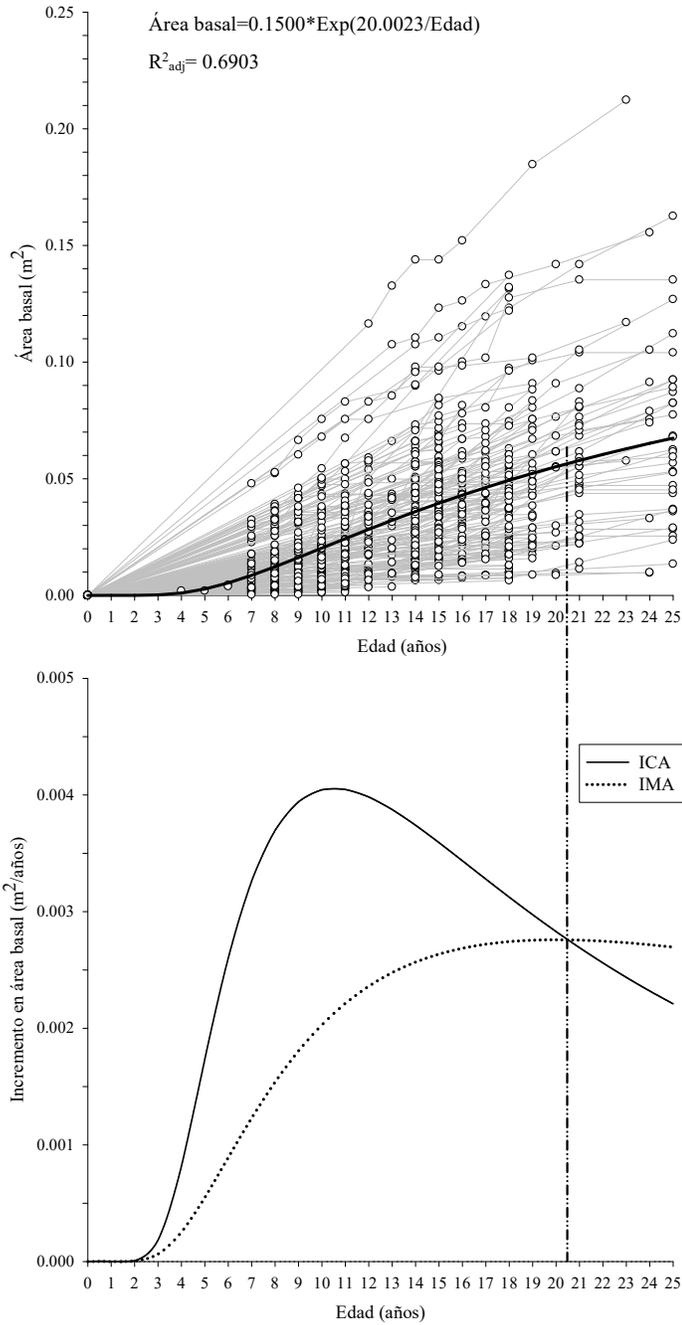


Figura 5. Diagrama de dispersión de datos observados en campo, con una curva de ajuste del modelo mejor ajustado para la variable área basal (grafica superior) y curvas de ICA e IMA en relación a los estimados del modelo mejor ajustado (grafica inferior). La línea punteada representa el turno absoluto donde es la intersección del ICA e IMA

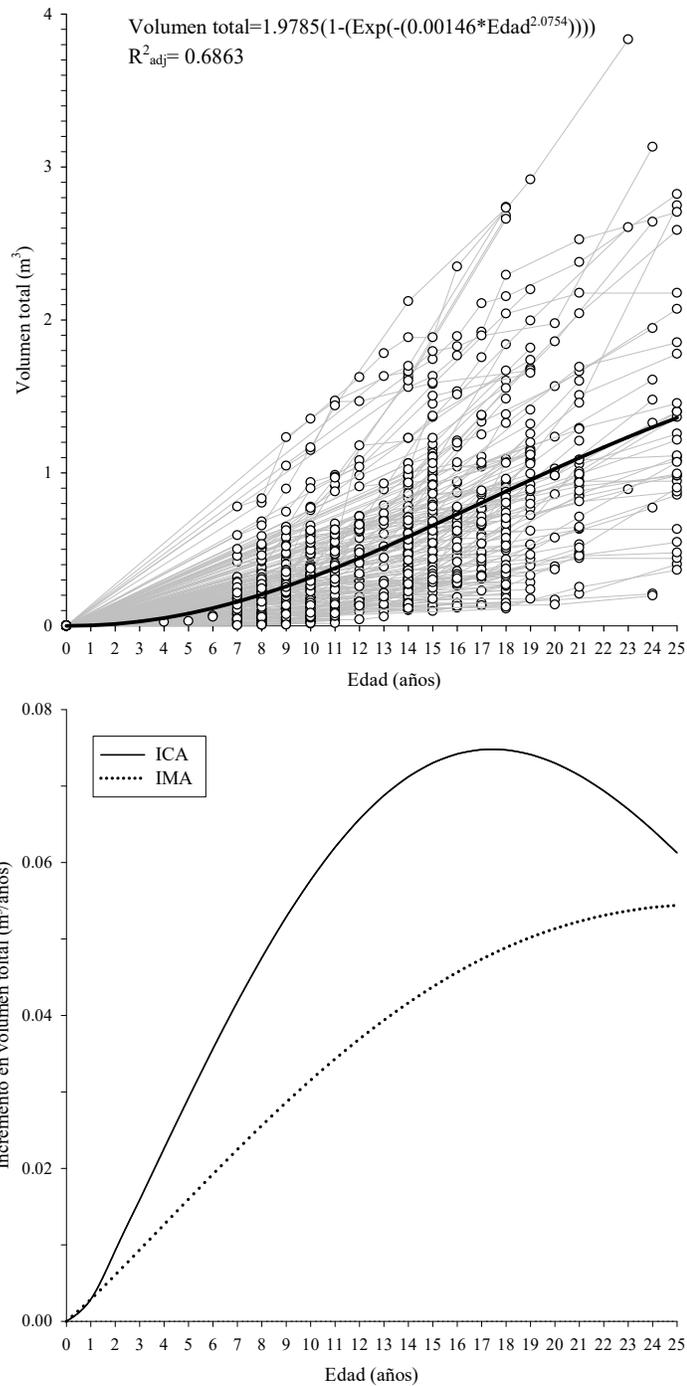


Figura 6. Diagrama de dispersión de datos observados en campo, con una curva de ajuste del modelo mejor ajustado para la variable volumen total (grafica superior) y curvas de ICA e IMA en relación a los estimados del modelo mejor ajustado (grafica inferior).

#### 4.2.4 Estimación de incremento y turno absoluto en volumen total

El comportamiento del ICA e IMA para la variable volumen total (Figura 6) podemos observar que el ICA de la plantación alcanza un máximo crecimiento a los 17 años con un valor de 0.07476 (m<sup>3</sup>/año), después de años 18 empezó a decrecer, por lo tanto, el valor máximo del IMA se da a los 25 años con valor de 0.05441 (m<sup>3</sup>/año); se puede observar que aun va creciendo la curva, de igual forma se observa aún no hay un punto de inflexión entre la curva de ICA e IMA.

En el estudio realizado en la zona, por Ruiz (2015), encontró en un ICA máximo en los primeros años, manteniéndose hasta el año 11, por lo que, el IMA su máximo crecimiento fue, en el año 14 y 8 meses, donde también fue la intersección para obtener el turno absoluto máximo.

### 4.3 Estimación de turno técnico y análisis

#### 4.3.1 Determinación de dimensiones comerciales que demanda cedro rojo (*Cedrela odorata* L.)

Con respecto a la especie de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.), Morales-Hernández, (2022) señala, que lo que es más importante es el color y la consistencia, por lo que el olor se da cuando ya está rojo, ya que contiene una alta concentración de sales, por lo tanto, en plantaciones forestales comerciales para hacer aprovechamiento tiene que llegar al turno absoluto en su caso a turno técnico, por lo que es muy raro que haya cortas intermedias ya que no se practica por que la madera es muy tierna y no tiene color ni olor. En San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca a partir de año 10 el arbolado empieza a madurar la corteza definitiva, por lo tanto, en el año 20 de la plantación forestal comercial con enriquecimiento de acahuales se aplicó una poda, la cual casi no se realiza en plantaciones y en promedio favoreció en 2 m de fuste limpio (Apéndice 4) por otra parte, indica que la insolación le da más resistencia a la madera (Apéndice 3).

Morales-López, (2022) indica, que la madera tierna no se le encuentra mercado por lo que la madera que aún no llega a la coloración rojiza, por lo que también cuenta con un olor muy bajo, por lo que con el olor se puede saber del tipo de madera que se transporta, sin embargo, en el futuro próximo con equipo industrial maderero adecuado se fabricar tableros espigados y enlistonados y/o enchapados.

#### 4.3.2 Determinación de a través de las curvas de crecimiento ajustadas

De acuerdo con Morales-Hernández (2022), en plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. no hay diámetros mínimos de corta, por lo tanto, se maneja la edad de la plantación (Apéndice 5 y 6) , por lo que ya se cuentan con 25 años de establecida, en base a la pudrición de albura en orquetas de las ramas, además de ya contar con el color rojizo la madera y tiene una porción menor de albura (Apéndice 7 y 8 ) lo que indica que pueden ser aprovechados, por lo que los principales productos que salen es madera en escuadría, a los 25 años se van a encontrar diámetros de la categoría de 15 cm hasta la de 45 cm dentro de la plantación (Figura 7).

Sin embargo, Morales-López (2022) señala que en estado natural *Cedrela odorata* L. en Escárcega, Campeche, encontrar un diámetro mínimo de corta de 50 cm es muy difícil ya que solo se encuentra en zonas de conservación, por lo que lo han bajado a un diámetro mínimo de corta 35 cm. Por lo tanto en plantación de San José Chacala, Pochutla, Oaxaca esos diámetros los encontraríamos solo en árboles dominantes, en base la calidad de sitio por ende a partir de esas curvas se estimaría el turno técnico, por lo que también dependería si la semilla de planta viene mejorada o no, otro punto importante es el tipo de suelo y en la exposición que se encuentra, por lo que si estimamos la curva de diámetro promedio con el modelo de Gompertz que fue el que mejor ajuste en diámetro pasa de los 200 años, lo que implicaría que fuera un turno fisiológico (Figura 7). De igual manera, en Escárcega, Campeche en estado natural se han cortado individuos con una edad de 20 años en suelos negros y profundos, donde la madera ya está madura (con duramen), por lo que, si tomamos ese turno de 20 años para la plantación de San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca

encontramos diámetros de la categoría de 10 cm hasta la de 45 cm para ser aprovechados, sin embargo, no se tendría una precisión exacta de la coloración de la madera (Figura 7).

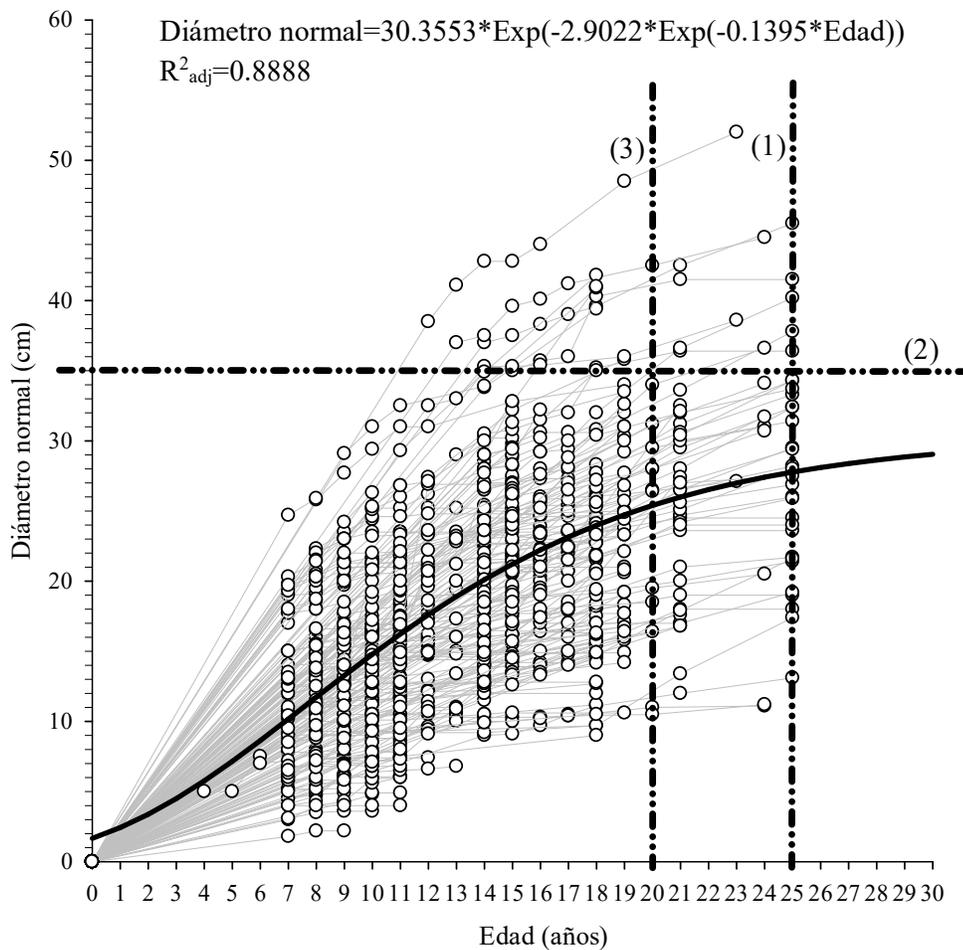


Figura 7. Gráfica de comportamiento de crecimiento en diámetro derivado del modelo con mejor ajuste de *Cedrela odorata* L. en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca y Candelaria Loxicha, Pochutla, Oaxaca, Nota: turno técnico de 25 años (1), 20 años (3) y de 35 cm de diámetro mínimo de corta (2).

## 5. CONCLUSIONES

Se acepta la hipótesis nula ya que todos los modelos en la variable de altura total, diámetro normal, área basal y volumen total, son altamente significativos.

Los modelos de mejor ajuste que estiman el crecimiento promedio en la plantación fueron: para altura total el modelo de Schumacher modificado por Bailey y Clutter, en cambio para diámetro normal fue Gompertz, sin embargo, para área basal el modelo de Schumacher y por último en volumen fue el modelo de Weibull.

En las variables de diámetro normal y área basal el valor de IMA alcanzó su máximo crecimiento a los 25 años de establecida la plantación, tomándose esta edad como turno absoluto en *Cedrela odorata* L., esto fue resultado de las practicas silvícolas y el medio físico en que se encuentra la plantación.

Existen turnos técnicos de 20 y 25 años de edad los cuales aplican en la curva de mejor ajuste en la variable diámetro normal, por lo tanto, el diámetro mínimo de corta de 35 cm solo aplicaría para árboles dominantes dentro de la plantación.

## 6. RECOMENDACIONES

Continuar con el trabajo de comportamiento de crecimiento en las variables de altura total, diámetro normal, área basal y volumen total. por ende, realizar análisis troncal en la especie de *Cedrela odorata* L. en Pochutla, Oaxaca para que no se sobreestime los valores de los primeros 6 años que no se evaluó la plantación y se tenga un mejor ajuste con los modelos, por lo que también va a cambiar el comportamiento de las curvas de ICA e IMA.

Hacer un estudio de índice de calidad de sitio para poder ver el potencial de productividad, dependiendo de la altura dominante de la especie de *Cedrela odorata* L. y llevarlo de lo general (polígono de plantación) a lo específico (exposiciones topográficas en la que se encuentra) y analizar la productividad.

Contar con un estudio de propiedades físicas y químicas de la madera de *Cedrela odorata* L. en una plantación de enriquecimiento de acahuales. Además de definir correctamente la madera color rojiza, ya que hay controversia en las definiciones por lo que hay literatura que lo llaman duramen.

Se debe tomar en cuenta que las plantaciones forestales comerciales de *Cedrela odorata* L. tienen un alto riesgo de inversión, además de su compleja gestión debido a que se encuentra en la NOM-059-SEMARNAT-2010 y su ubicación en CITES, debido a esto se considera la Ley de Vida Silvestre y la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente para el establecimiento y operación de UMAS de las futuras plantaciones, tomando en cuenta las condiciones agroecológicas y de las plagas forestales que la persiguen.

## 7. LITERATURA CITADA

- Aguilar, R. M. 1991. Comparación de cuatro modelos matemáticos aplicados al crecimiento forestal. *Revista Ciencia Forestal en México*, 16(70): 87-108.
- Alberdi, I., Aguirre, A., Hernández, L., Vallejo, R., Cañelas, I., y Condes, S. 2013. La estimación de los árboles añosos en el Inventario Nacional Forestal. 6° Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales. 13 p.
- Alder, D. 1980. Estimación de volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial en los trópicos. Vol. 2: Predicción del rendimiento. Estudio FAO: Montes 22/2. Roma, Italia. 209 p.
- Argüelles-Suárez, L.A., García T. Z.H.M., Forster H. R., Rodríguez S. J., Torres P. J.A. 2007. Programa Estratégico de Desarrollo Forestal Sustentable del Estado de Campeche (PEDFSC). TROPICULTURA S.P.R. de R.L. de C.V. Secretaria de Desarrollo Rural. Gobierno del Estado de Campeche. 149 p.
- Arteaga Martínez, B., Izaguirre, R. C. 2004. Comportamiento de especies tropicales bajo tres sistemas de plantación. *Foresta Veracruzana. Recursos Genéticos Forestales*. Xalapa, México. 6(1): 45-5.
- Arreaza-Rodas, T. P. 2017. Generación de un paquete tecnológico para el manejo forestal sostenible en plantaciones y bosque natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en Guatemala. Tesis profesional de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, Centroamérica. 128 p.

- Avendaño L. L. 2018. Crecimiento y turno absoluto en plantaciones de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose. en San Pedro Pochutla, Oaxaca. Tesis profesional de Licenciatura. Departamento forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 64 p.
- Beltrán, G., L. A. y Valencia, R., G. M. 2013. Anatomía de anillos de crecimiento de 80 especies arbóreas potenciales para estudios dendrocronológicos en la Selva Central, Perú. *Revista de Biología tropical*, 61(3): 1025-1037.
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P y Grebner, D. -L. 2009. *Forest management and planning*. Elsevier. New York. 342 p.
- Bailey, R.L. and Clutter, J.L. 1974. Base-age invariant polymorphic site curve. *Forest Science*, 20(2): 155-159.
- Bravo M., A. 2007. Estimación maderable y evaluación financiera de plantaciones forestales comerciales de cedro y caoba en Oaxaca, México. Tesis profesional de Maestría. Instituto de Enseñanza e Investigación de Ciencias Agrícolas. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 99 p.
- Casals C. V. 2005. El turno forestal, la propiedad de los montes y de la recepción de la fórmula de Faustmann en España, 1849-1918. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. Universidad de Barcelona. 9(182). Recuperado de: <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-182.htm>
- Carlson K., A. 2004. Guías silviculturales de árboles nativos en plantaciones comerciales y agroforestales de trópico húmedo de México. Tesis profesional de licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. 743 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (s.f.) Situación actual y perspectiva de las plantaciones forestales comerciales en México. CONAFOR. Zapopan, Jalisco. 472 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2011. Evaluación de Costo de Establecimiento y Mantenimiento de Plantaciones Forestales Comerciales. México 79 p.

- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2014. México cuenta con más de 270 mil hectáreas de Plantaciones Forestales Comerciales – Boletín 77. México. 2 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2020. Superficie prioritaria para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales. Estrategia Nacional de Plantaciones Forestales Comerciales 2020-2024. Coordinación General de Producción y Productividad. Gerencia de Plantaciones Forestales Comerciales. 3 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2021. Comisión Nacional Forestal-Programa Anual de Trabajo 2021. 222 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y Asociación Mexicana de Plantadores Forestales, A.C. (AMEPLANFOR A.C.) 2016. Situación actual del germoplasma utilizado en los programas de plantaciones forestales comerciales en el Sureste de México – Diagnóstico. México, 125 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) 2021. Especies / Distribución de las especies. Ciudad de México. Recuperado de: <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/distribesp>
- Contreras C., C. A. 2021. Evaluación integral de una plantación forestal comercial proveniente de un acahual enriquecido. Tesis profesional de Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 92 p.
- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES). 2015. Texto de la convención. 17 p. Citado el 07-06-2022. Recuperado de: <https://cites.org/sites/default/files/esp/disc/CITES-Convention-SP.pdf>
- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES). 2019. Examen de las propuestas de enmienda a los Apéndices I y II. CoP18 Prop. XXX. Colombo (Sri Lanka). 31 p. [https://cites.org/sites/default/files/eng/cop/18/prop/020119\\_d/S-CoP18-Prop\\_draft-Cedrela-spp.pdf](https://cites.org/sites/default/files/eng/cop/18/prop/020119_d/S-CoP18-Prop_draft-Cedrela-spp.pdf)

- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES). 2021. Apéndice I, II y III. 84 p.  
<https://cites.org/sites/default/files/esp/app/2021/S-Appendices-2021-06-22.pdf>
- Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES). 2022a. *Swietenia macrophylla* 2010-2011 – CITES. Informes de Países Áreas de Distribución. Citado el 14-04-2022. Recuperado de:  
<https://cites.org/sites/default/files/esp/com/pc/20/S20-19-01-A3.xls>
- Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES). 2022b. The CITES Appendices. Citado el 07-06-2022. Recuperado de:  
<https://cites.org/eng/app/index.php>
- Coronel, de R., M. 2017. Determinación del turno forestal: bases teóricas y aplicaciones prácticas. Primera edición. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. 84 p.
- Corral R., S. y Návar C. J. J. 2005. Análisis de crecimiento e incremento de pináceas de los bosques de Durango, México. *Madera y Bosque*, 11(1): 29-47.
- Corral-Rivas, J. J., Vargas. B., Wehenkel, C., Aguirre, C. O. A. & Crecente, C. F. 2013. Guía para el Establecimiento, Seguimiento y Evaluación de Sitios Permanentes de Monitoreo en Paisaje Productivos Forestales. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal. CONAFOR & CONACYT. 93p.
- Corral-Rivas, J. J., Vargas. B., Wehenkel, C., Aguirre, C. O. A. & Rojo, A. A. 2009. Establecimiento de Sitios de Investigación Forestal y de Suelos en Bosques del Estado de Durango. Editorial UJED. Durango. 81 p.
- Cruz M. M. 2013. Crecimiento de tres especies forestales en plantaciones con enriquecimiento de acahual y agroforestal en Pochutla, Oaxaca. Tesis profesional de Licenciatura. Departamento forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 50 p.
- DOF. Diario Oficial de la Federación (2008, 17 de noviembre). NORMA Oficial Mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006. Que establece los lineamientos, criterios de

contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de los recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas. Recuperado de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5064731&fecha=17/10/2008#gsc.tab=0](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5064731&fecha=17/10/2008#gsc.tab=0)

DOF. Diario Oficial de la Federación (2010, 30 de diciembre). NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental- Especies nativas de México de flora y fauna silvestres- Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio- Lista de especies en riesgo. Recuperado de: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5173091](https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091)

Domínguez-Calleros P. A., Rodríguez-Flores F de J., Lizárraga-Mendiola L., Jiménez-Gómez M. A. y Navar J. 2017. Aplicaciones y ejemplos de modelos de crecimiento diamétrico para árboles tropicales. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(11): 265-274.

Díaz B., L. 1997. Turno forestal económicamente óptimo; Una revisión. *Economía Agraria*. 180: 181-224.

Durón-Ramos, M. 2022. Técnico Forestal. Carpintero de maderas preciosas. Aguascalientes, Aguascalientes. Comunicación personal. <https://www.facebook.com/martin.duron.355>

Fierros-González, A.M. 2012. Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales; a 15 años de su Creación. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jal. 190 p.

Flachsenberg, H. y Galletti, H. A. 1999. La Selva Maya, Conservación, y Desarrollo; El manejo forestal de la selva en Quintana Roo, México. Siglo XXI Editores. México. 475 p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2015. Sampling designs for national forest assessments; Knowledge reference for national forest assessments. (Eds. McRoberts R.E., Tomppo E. O., Czaplewski R. L.). FAO. SLU. Rome, Italy. pp. 21-40.

- Gadow, K., Sánchez, O. S., y Álvarez, G. J. G. 2007. Estructura y Crecimiento del Bosque: Estructura y Diversidad, Crecimiento del rodal y Crecimiento del árbol. Estructura y Crecimiento del Bosque. 287 p.
- Gagnon J. 2013. Forest ecology and management in Virginia. Virginia: Communications and Marketing Collage of Agriculture and Life Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University Publication. 12 p.
- Galán L. R. 2007. Crecimiento y rendimiento de especies arbóreas en una plantación de enriquecimiento de acahuals en sur de Oaxaca. Tesis profesional de Maestría. Instituto de Enseñanza e Investigación de Ciencias Agrícolas. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 107 p.
- Galán L. R., Santos P. H. H. y Valdez H. J I. 2008. Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose. en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Madera y Bosques, 14(2): 65-82.
- Gallegos-Rodríguez, A., Sánchez S. M., González C. G. A., Román M. L., Hernández Á. E., y Mora S. A. 2012. Diagnóstico del potencial, productividad y manejo de especies nativas maderables tropicales con alto potencial comercial. Capítulo 2. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Departamento de Producción Forestal. Unidad Académica “Manejo y Aprovechamiento Forestal”. Guadalajara, Jalisco. 43 p.
- Gamero-Gamero, A. M., Delgadillo-Martínez, J., Cortés-Flores, J. I., Velasco-Velasco, J., Velasco-Cruz, C. 2020. Propiedades del suelo afectadas por el tiempo de descanso en un sistema de roza-tumba-quema. Ecosistemas y recursos agropecuarios, 7(1): <https://doi.org/10.19136/era.a7nl.2098>
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Enriqueta García de Miranda. Universidad Autónoma Nacional de México. México, D.F. 217p.
- García C. X., Flores G. J. G. y Benavides S. J. de D. 2007. Índice de sitio para *Cedrela odorata* L. (Cedro Rojo) en Quintana Roo, México. Revista de Ciencias Forestales en México. 32(101): 71-92.

- Garrido-García, M. 2015. Estimación de modelos no lineales. Grado en Economía. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad de Valladolid. Valladolid. 49 p.
- Gómez-García, E. 2013. Modelos dinámicos de crecimiento para rodales regulares y su desagregación para la estimación de volúmenes y biomasa. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(3), 337-350.
- Gual, O. G. M., da Silva, J. A. A., Ferreira, R. L. C., Álvarez L., D., y Barrero M., H. 2019. Modelos matemáticos para la determinación de turno óptimo en plantaciones forestales. *Madera y Bosques*, 25(1), e2511636. doi: 10.21829/myb.2019.2511636
- Gujarati, D. N. y Porter, D. C. 2010. *Econometría*. Quinta Edición. McGraw-Hill/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V. México, D. F. 943 p.
- Hernández R. A. 2012. Determinación de turno e índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb., en el sureste del Estado de Hidalgo. Tesis profesional de Licenciatura. Departamento forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 76 p.
- Hernández S. N. 2013. Tabla de volúmenes para cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Tesis profesional de Licenciatura. Departamento forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 69 p.
- Herrera-Gloria, J.M. 2009. Programa de Manejo Forestal para el Aprovechamiento de Recurso Forestal Maderable del Ejido Álvaro Obregón, Municipio de Calakmul, Campeche. 99 p.
- Imaña E. J. y Encinas B. O. 2008. *Epidometría Forestal*. Universidad de Brasilia y Universidad de Los Andes. Brasil, Brasilia y Mérida, Venezuela. 66 p.
- INEGI. 1984. Carta de uso de suelo y vegetación. Puerto Escondido. D14-3. Escala 1:250,000. Oaxaca, México.
- INEGI. 1995. San Pedro Pochutla, Estado de Oaxaca. Cuaderno estadístico municipal. INEGI. Aguascalientes, Ags. 127 p.

- INEGI. 2000. Carta topográfica. San José Chacalapa. D14-B18. Escala 1:50,000. Oaxaca, México.
- INEGI. 2001a. Carta Provincias fisiográficas. Continuo nacional serie I. Escala 1:1,000,000. México.
- INEGI. 2001b. Carta Subprovincias fisiográficas. Continuo nacional serie I. Escala 1:1,000,000. México.
- INEGI. 2004. Guía para la interpretación de cartografía. Edafología. INEGI. Aguascalientes, Ags. 33 p.
- INEGI. 2005a. Guía para la interpretación de cartografía. Climatología. INEGI. Aguascalientes, Ags. 48 p.
- INEGI. 2005b. Guía para la interpretación de cartografía. Geología. INEGI. Aguascalientes, Ags. 31 p.
- INEGI. 2005c. Prontuario d información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. San Pedro Pochutla, Oaxaca. Clave geoestadística 20324.
- INEGI. 2017. Guía para la interpretación de cartografía. usos de suelo y vegetación: escala 1:250,000: serie VI / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 210 p.
- Klepac D. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Segunda edición. Universidad Autónoma Chapingo. 297 p.
- Lara Ponce, E., Caso Barrera, L., Aliphat Fernández M. 2012. El sistema milpa roza tumba y quema de los Maya Itzá de San Andrés y San José, Petén Guatemala. Ra Ximhai. Universidad Autónoma Indígena de México. 8(2): 71-92.
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Diario oficial de la Federación, 5 de junio de 2018. Reforma: Diario Oficial de la Federación, 26 de abril de 2021. México. 72 p. Recuperado en febrero de 2022. [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS\\_260421.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS_260421.pdf)

- Ley General de Vida Silvestre. Diario oficial de la Federación, 3 de julio de 2000. Reforma: Diario Oficial de la Federación, 20 de mayo de 2021. México. 76 p. Recuperado en junio de 2022. [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/146\\_200521.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/146_200521.pdf)
- Lindenmayer, D. B., Cunningham, R. B. 2000. Cavity sizes and types in Australian Eucalypts from wet and dry forest: A simple of rule thumb for estimating size and number of cavities. *Forest Ecology and Management*. 137(1-3): 139-150.
- López, Sánchez., E. 2004. Manual para el diseño, establecimiento y manejo de los principales sistemas agroforestales con cedro rojo, cedro nogal y primavera, una alternativa para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales en los Tuxtlas, Veracruz. Tesis de Maestría. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, México. 256 p.
- Madrigal, C. R. de J. 2021. Evaluación de Plantaciones Forestales Comerciales (PFC). Instituto de Ecología A.C. (INECOL). <http://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2013-06-05-10-34-10/17-ciencia-hoy/1512-evaluaciones-de-plantaciones-forestales-comerciales>
- Martínez, S. M., Sosa, P. G., Chacón, S. J. M., Pinedo, A. A., Villareal, G. F. y Prieto, A. J. A. 2019. Monitoreo forestal por medio de Sitios Permanentes de Investigación Silvícola en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(55), DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.511>
- Martínez Ruiz, R., Azpíroz Rivero, H., Rodríguez De la O, J. L., Cetina Alcalá, M. y Gutiérrez Espinoza M. A. 2006. Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. Ra Ximhai. *Revista de Sociedad Cultural y Desarrollo Sustentable*. Universidad Autónoma Indígena de México. 2(003): 815-846.
- Martínez -Zurimendi, P., Domínguez-Domínguez, M., Juárez-García, A., López-López, L. M., De la Cruz-Arias, V. & Álvarez-Martínez, J. 2015. Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Revista fitotecnia mexicana*, Chapingo, 38(4): 415-425.

- Montero-Solís, F. M., Álvarez-Muñoz, J. y López-López, M. 2019. Potencial productivo de *Cedrela odorata* L.: estimación mediante el modelo 3-PG. *Madera y Bosques*, 25(2), 2521641 DOI: 10.21829/myb.2019.2521641
- Mora, F., Meza, V. 2003. Curvas de índice de sitio para teca (*Tectona grandis* Linn.) en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica. Instituto de Investigación y Servicios Forestales. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. 26 p.
- Mora, F., Meza, V., Porras, Á., Sandi, C. y Aguilar, L. 2019. Curvas diferenciadas de índice de sitio para *Vochysia guatemalensis* en la región Huetar Norte de Huetar Caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 34(2), 123-138.
- Morales-Castillo, I. 2005. Plan de Manejo Forestal Integral. Unidad de Manejo Forestal Hoja Blanca del Sur. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible ENDESA/BOTROSA. BOSQUES TROPICALES S.A. (BOTROSA). Fundación Forestal Juan Manuel Durini, Quito, Ecuador. 47 p.
- Morales H., J. 1997. Programa de manejo forestal de las plantaciones forestales en San José Chacalapa, Pochutla y Candelaria Loxicha, Oaxaca. Agrosilvícola San José S.P.R. de R.L. Pochutla, Oaxaca. 32p.
- Morales- Hernández, J. 2022. Ingeniero Forestal. Prestador de Servicios Técnicos Forestales. San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Comunicación personal. Email: moraleshj53@gmail.com
- Morales-López, P. 2022. Ingeniero Forestal Prestador de Servicios Técnicos Forestales. Escárcega, Campeche. Comunicación personal. Email: forestalpml@gmail.com
- Morales O. E. R. y Herrera T. L. G. 2009. Cedro (*Cedrela odorata* L.) Protocolo para su Colecta, Beneficio, Almacenaje. Comisión Nacional Forestal. Región XII Península de Yucatán. Departamento de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales. Programa de Germoplasma Forestal. Estado de Yucatán. 23 p.
- Musalem, S., M. A. 2006. Silvicultura de plantaciones forestales. Primera Edición. Universidad Autónoma Chapingo. México. 314 p.

- Palomeque, F. E. 2011. Evaluación dasométrica de una plantación de *Cedrela odorata* L. en Mapastepec, Chiapas. Tesis profesional de Licenciatura. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma de Chiapas. Huehuetán, Chiapas. 78 p.
- Parraguirre Lezama, C. 1993. Métodos de enriquecimiento de las selvas en Quintana Roo. *Ciencia Forestal en México*, 18(74): 64-67.
- Peng C. 2000. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. *Forest Ecology and Management* 132, 259-279.
- Pennington, T. D. & Sarukhán, J. 2005. Árboles Tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. Texto Científico Universitario. Tercera edición. Fondo de la Cultura Económica. Universidad Nacional Autónoma de México. D.F. 521p.
- Pérez, G. O., del Castillo, S. R.F. 2018. Folleto de divulgación: Sustitución de sistema roza-tumba-quema itinerante y su relación con la conservación de la (agro)biodiversidad en el bosque de niebla de Oaxaca, México. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca. 3 p.
- Quintero C. H. 2005. Crecimiento de dos especies tropicales maderables en plantaciones en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Tesis profesional de Licenciatura. Departamento forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 81 p.
- Ramírez, G. C., Vera, C. G., Carrillo, A. F., Magaña, T. O. 2008. El cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) como una alternativa de reconversión de terrenos agrícolas en sur de Tamaulipas. *Agricultura Técnica en México*, 34(2), 234-250.
- Ruiz G. C. G. 2015. Crecimiento y turno de *Cedrela odorata* L. a 17 años de establecimiento en plantaciones de acahual, Pochutla, Oaxaca. Tesis profesional de Licenciatura. Departamento forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 64 p.

- Salazar, R., D. Joker and L. Schmidt. 2000. *Cedrela Odorata* L.: Seed leaflet CATIE-DFSC. No. 20. Turrialba, Costa Rica. 2 p.
- Sandoval G. R. 2010. Crecimiento en diámetro y altura de tres especies tropicales de plantaciones comerciales en Pochutla, Oaxaca. Tesis profesional de Licenciatura. Departamento forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 68 p.
- Santiago G. B. 2012. Análisis de crecimiento en diámetro y altura de tres especies tropicales en plantaciones de enriquecimiento en Pochutla, Oaxaca. Tesis profesional de Licenciatura. Departamento forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 68 p.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2021. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2018. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos. México, 298 p.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2022. GEOINFOMEX – SGM. POWERED BR esri. Recuperado de: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>
- Silva-Guzmán, J. A. 2007. Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos maderas comercializadas en México: Tomo II. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 132 p.
- Sit, V. y Poulin-Costello, M. 1994. Catalog of Curve for Curve Fitting. Province of British Columbia. Ministry of Forests. Victoria, B. C. 116 p.
- Tamarit-Urias, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Aldrete, A., Valdez-Lazalde, J. R., Ramírez-Maldonado, H. & Guerra-De la Cruz, V. 2019. Sistema de crecimiento y rendimiento maderable para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. F.) en Campeche, México. *Madera y Bosque*, 25(3), e2531908. Doi:10.21829/myb.2019.2531908
- Trujillo-Ubaldo, E., Álvarez-López, P.S., Valdovinos-Chávez, V.R., Benítez-Molina, G. y Rodríguez-González, L.O. 2018. Turnos forestales en plantaciones maderables de

- Eucalyptus grandis* Hill en Maiden, en Balancán, Tabasco. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9(48): 27-46.
- Valdez H., J.I. 2004. Manejo forestal de un manglar al sur de Marismas Nacionales, Nayarit. Madera y Bosques. Número especial 2:93-104.
- Valera-Rivera, F. 2020. Análisis multinivel para el modelaje forestal. Tesis profesional de Doctorado en Matemáticas. Facultad de Matemáticas. Universidad Veracruzana. Xalapa de Enríquez, Veracruz. 216 p.
- Vanclay J. K. 1995. Growth models for tropical forests: a synthesis of models and methods. Forest Science, 41(1), 7-42.
- Vega, A. A. 2013. Evaluación de plantaciones forestales comerciales establecidas entre 1994 y 1996 en Los Tuxtlas, Veracruz. Tesis profesional de Maestría. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Veracruzana. Xalapa de Enríquez, Veracruz. 117 p.
- Velázquez C. M. M. 2018. Crecimiento en plantaciones de *Cedrela odorata* L. y *Swietenia macrophylla* King. en San Pedro Pochutla, Oaxaca. Tesis profesional de Licenciatura. Departamento forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 64 p.
- Venegas H. G. 2016. Cambios recientes en el sistema de roza-tumba-quema en el sur de la península de Yucatán. Tesis profesional de Maestría. El Colegio de la Frontera Sur. Chetumal, Quintana Roo, México. 90 p.
- Vignote-Peña, S. 2014. Principales maderas tropicales utilizadas en España. Características, Tecnología y Aplicaciones. Universidad Politécnica de Madrid. 149 p.
- Zamudio, V. L. J., 2020. Análisis de datos de parcelas de monitoreo CONIF en plantaciones forestales con fines comerciales y plan piloto de zonificación en base a elementos técnicos de M.N.E. e instrumentos de política. Monografía de investigación de Licenciatura. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D. C. 119 p.
- Zeide B. 1993. Analysis of growth equations. Forest Science, 39(3), 594-616.

Zeide B. 1995. A relationship between size of trees and their number. *Forest Ecology and Management*, 72: 265-272.

Zeide B. 1999. Pattern of height growth for southern pine species. *Forest Ecology and Management*, 118: 183-196.

## APÉNDICES

Apéndice 1. Plantación forestal comercial con enriquecimiento de acahual en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.



Apéndice 2. Sitio permanente de plantación forestal comercial con enriquecimiento de acahuales en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.





Apéndice 3. Exposición norte con insolación en *Cedrela odorata* L. en plantación con enriquecimiento de acahual en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

Apéndice 4. Fuste de árboles de *Cedrela odorata* L. en plantación comercial con enriquecimiento de acahual en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.



Apéndice 5. Diámetro promedio de una rodaja a una altura de 0.30 m de *Cedrela odorata* L. con una edad de 24 años de la plantación de con enriquecimiento de acahual de San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.



Apéndice 6. Vista panorámica con escala de 20 cm a 0.30 m de altura en *Cedrela odorata* L. de la plantación de con enriquecimiento de acahual de San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.



Apéndice 7. Vista panorámica del comportamiento de los anillos de crecimiento en la formación de contrafuertes de *Cedrela odorata* L. de plantación de con enriquecimiento de acahual de San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.



Apéndice 8. Vista longitudinal de formación de un contrafuerte en la parte baja de la rodaja, y vista de los anillos de crecimiento de *Cedrela odorata* L. de la plantación con enriquecimiento de acahual en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.



Apéndice 8. Vista longitudinal de formación de un contrafuerte en la parte baja de la rodaja, y vista de los anillos de crecimiento de *Cedrela odorata* L. de la plantación con enriquecimiento de acahual en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. (Continuación).

