



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y  
SERVICIO EN SUELOS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL  
DESARROLLO SOSTENIBLE

DIVERSIDAD ECOLÓGICA Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO  
SUSTENTABLE DEL COPAL (*Bursera spp.*) COMO ÁRBOL DE USOS  
MÚLTIPLES

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL  
DESARROLLO SOSTENIBLE

Presenta:

SELENE DEL CARMEN ARRAZATE JIMENEZ

Bajo la supervisión de:

ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ, DRA.

JULIO CÉSAR BUENDÍA ESPINOZA, DR.

MIGUEL URIBE GÓMEZ, DR.

ALEJANDRO SÁNCHEZ VÉLEZ, DR.



**APROBADA**



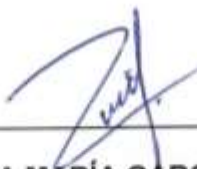
Chapingo, Estado de México, abril de 2022

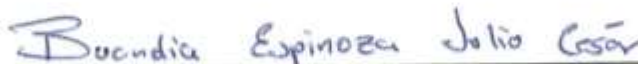
**DIVERSIDAD ECOLÓGICA Y PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO  
SUSTENTABLE DEL COPAL (*Bursera* spp.) COMO ÁRBOL DE USOS  
MÚLTIPLES**

Tesis realizada por la C. Selene del Carmen Arrazate Jimenez bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO  
SOSTENIBLE**

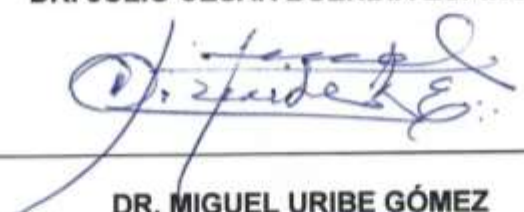
DIRECTOR: \_\_\_\_\_

  
**DRA. ROSA MARÍA GARCÍA NÚÑEZ**

CODIRECTOR:  \_\_\_\_\_

**DR. JULIO CÉSAR BUENDÍA ESPINOZA**

ASESOR: \_\_\_\_\_

  
**DR. MIGUEL URIBE GÓMEZ**

ASESOR: \_\_\_\_\_

  
**DR. ALEJANDRO SÁNCHEZ VÉLEZ**

## CONTENIDO

|                                                                                         |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE CUADROS .....                                                                 | vii  |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                                                  | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                                 | ix   |
| DEDICATORIA .....                                                                       | xi   |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                                   | xii  |
| DATOS BIOGRÁFICOS .....                                                                 | xiii |
| RESUMEN GENERAL .....                                                                   | xiv  |
| GENERAL ABSTRACT .....                                                                  | xv   |
| 1 INTRODUCCIÓN GENERAL .....                                                            | 16   |
| 2 OBJETIVOS .....                                                                       | 18   |
| 2.1 Objetivo general .....                                                              | 18   |
| 2.2 Objetivos específicos .....                                                         | 18   |
| 3 REVISIÓN DE LITERATURA .....                                                          | 19   |
| 3.1 Bosque Tropical Caducifolio .....                                                   | 19   |
| 3.2 Productos forestales no maderables (PFNM) .....                                     | 20   |
| 3.2.1 Aprovechamiento de los productos forestales no maderables .....                   | 22   |
| 3.3 Copal .....                                                                         | 24   |
| 3.3.1 Importancia cultural del copal .....                                              | 24   |
| 3.3.2 Características morfológicas de las especies productoras de resina de copal ..... | 25   |
| 3.3.3 Diversidad ecológica de los sitios donde se extrae el copal .....                 | 27   |
| 3.4 Aprovechamiento sustentable del copal .....                                         | 29   |
| 3.4.1 Sobreexplotación del copal .....                                                  | 30   |
| 3.4.2 Conservación natural del copal .....                                              | 31   |
| 3.5 Literatura citada .....                                                             | 32   |

|       |                                                                                                              |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4     | CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA Y BIOFÍSICA DE LA MICROCUENCA AGUA ESCONDIDA, PUEBLA .....                    | 35 |
| 4.1   | Resumen .....                                                                                                | 35 |
| 4.2   | Abstract.....                                                                                                | 36 |
| 4.3   | Introducción .....                                                                                           | 36 |
| 4.4   | Materiales y métodos.....                                                                                    | 38 |
| 4.4.1 | Área de estudio .....                                                                                        | 38 |
| 4.4.2 | Caracterización socioeconómica.....                                                                          | 39 |
| 4.4.3 | Caracterización biofísica: unidades de paisaje .....                                                         | 39 |
| 4.5   | Resultados y discusión .....                                                                                 | 41 |
| 4.5.1 | Caracterización socioeconómica.....                                                                          | 41 |
| 4.5.2 | Caracterización biofísica: unidades de paisaje .....                                                         | 44 |
| 4.6   | Conclusiones .....                                                                                           | 55 |
| 4.7   | Agradecimientos .....                                                                                        | 56 |
| 4.8   | Literatura citada .....                                                                                      | 56 |
| 5     | COMPOSICIÓN Y DIVERSIDAD DE ESPECIES EN POBLACIÓN NATURAL SUJETA A EXTRACCIÓN DE COPAL EN LA MIXTECA POBLANA | 58 |
| 5.1   | Resumen .....                                                                                                | 58 |
| 5.2   | Abstract.....                                                                                                | 59 |
| 5.3   | Introducción .....                                                                                           | 59 |
| 5.4   | Materiales y métodos.....                                                                                    | 61 |
| 5.4.1 | Área de estudio .....                                                                                        | 61 |
| 5.4.2 | Muestreo de la vegetación .....                                                                              | 62 |
| 5.4.3 | Índice estructural IVI.....                                                                                  | 64 |
| 5.4.4 | Medida de la diversidad de especies .....                                                                    | 66 |
| 5.5   | Resultados.....                                                                                              | 67 |
| 5.5.1 | Composición florística .....                                                                                 | 67 |

|       |                                                                                                                                                 |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5.2 | Índice estructural IVI.....                                                                                                                     | 70  |
| 5.5.3 | Medida de la diversidad de especies .....                                                                                                       | 73  |
| 5.6   | Discusión .....                                                                                                                                 | 77  |
| 5.6.1 | Composición florística .....                                                                                                                    | 77  |
| 5.6.2 | Índice estructural IVI.....                                                                                                                     | 78  |
| 5.6.3 | Medida de la diversidad de especies .....                                                                                                       | 80  |
| 5.7   | Conclusiones .....                                                                                                                              | 82  |
| 5.8   | Agradecimientos .....                                                                                                                           | 82  |
| 5.9   | Literatura citada .....                                                                                                                         | 83  |
| 6     | APLICACIÓN DE UN MODELO DE BOSQUE ALEATORIO PARA<br>EXPLICAR LA PRODUCCIÓN DE RESINA EN ÁRBOLES DE COPAL ( <i>Bursera</i><br><i>spp.</i> )..... | 88  |
| 6.1   | Resumen .....                                                                                                                                   | 88  |
| 6.2   | Abstract.....                                                                                                                                   | 89  |
| 6.3   | Introducción .....                                                                                                                              | 89  |
| 6.4   | Materiales y métodos.....                                                                                                                       | 92  |
| 6.4.1 | Área de estudio .....                                                                                                                           | 92  |
| 6.4.2 | Variables Respuesta .....                                                                                                                       | 93  |
| 6.4.3 | Variables explicativas.....                                                                                                                     | 95  |
| 6.4.4 | Base de datos y medición de variables .....                                                                                                     | 97  |
| 6.4.5 | Selección de variables .....                                                                                                                    | 98  |
| 6.4.6 | Árbol de decisiones .....                                                                                                                       | 99  |
| 6.5   | Resultados.....                                                                                                                                 | 101 |
| 6.5.1 | Base de datos y selección de variables .....                                                                                                    | 101 |
| 6.5.2 | Árboles de decisiones .....                                                                                                                     | 102 |
| 6.6   | Discusión .....                                                                                                                                 | 106 |
| 6.6.1 | Evaluación de la precisión.....                                                                                                                 | 106 |
| 6.6.2 | Identificación de variables significativas.....                                                                                                 | 107 |

|       |                                             |     |
|-------|---------------------------------------------|-----|
| 6.6.3 | Diagrama de dependencia parcial (PDP) ..... | 108 |
| 6.7   | Conclusiones .....                          | 109 |
| 6.8   | Agradecimientos .....                       | 110 |
| 6.9   | Literatura citada .....                     | 110 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Cuadro 1.</b> Topoformas delimitadas en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                              | 44 |
| <b>Cuadro 2.</b> Superficie por rango de pendientes en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.....                                                   | 45 |
| <b>Cuadro 3.</b> Ecuaciones de regresión lineal simple generados para realizar el mapa de temperatura de la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ... | 46 |
| <b>Cuadro 4.</b> Temperatura media anual y mensual en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.....                                                    | 47 |
| <b>Cuadro 5.</b> Valor observado de precipitación anual y mensual por rango de temperatura en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....           | 48 |
| <b>Cuadro 6.</b> Clima identificado en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                  | 50 |
| <b>Cuadro 7.</b> Uso de suelo y vegetación encontrados en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.....                                                | 51 |
| <b>Cuadro 8.</b> Unidades de paisaje en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                 | 52 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabla 1.</b> Nombre común, científico y familia de las especies presentes en el área de estudio (ordenados por familias).....                                                                                                                          | 68  |
| <b>Tabla 2.</b> Abundancia, Frecuencia, Dominancia, e Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies presentes en el ejido de San Juan Raboso, Izúcar de Matamoros, Puebla (ordenados de manera descendente de acuerdo con el valor de su IVI. .... | 72  |
| <b>Tabla 3.</b> Factores e indicadores para estimar la producción de resina en árboles de copal. ....                                                                                                                                                     | 94  |
| <b>Tabla 4.</b> Factores e indicadores para determinar la condición de árboles de copal a partir de la adaptación de la guía de condición de árboles urbanos (Webster, 1978). ....                                                                        | 95  |
| <b>Tabla 5.</b> Rendimiento y validación cruzada del modelo final. ....                                                                                                                                                                                   | 104 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Mapa de ubicación de la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                                                                                                               | 39 |
| <b>Figura 2.</b> Mapa de fisiografía en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                                                                                                             | 45 |
| <b>Figura 3.</b> Mapa de temperatura media anual en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                                                                                                 | 47 |
| <b>Figura 4.</b> Mapa de precipitación media anual en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                                                                                               | 49 |
| <b>Figura 5.</b> Mapa de uso de suelo y vegetación en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                                                                                               | 51 |
| <b>Figura 6.</b> Mapa de unidades de paisaje en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                                                                                                     | 55 |
| <b>Figura 7.</b> Localización del área de estudio, en la microcuenca Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                                                                                               | 62 |
| <b>Figura 8.</b> Ubicación de las unidades de muestreo en el área de estudio. ....                                                                                                                                                                      | 64 |
| <b>Figura 9.</b> Número de géneros y especies por familia presentes en el área de estudio. ....                                                                                                                                                         | 70 |
| <b>Figura 10.</b> Distribución observada y ajuste de la distribución normal en el área de estudio. ....                                                                                                                                                 | 74 |
| <b>Figura 11.</b> Índice de Shannon en función de la riqueza. $a = \left[ \frac{r-e}{H_{\text{Máx}} - H} \right]^H$ , diferencia entre riqueza observada y equiabundante; $H_{\text{Máx}} - H$ , diferencia entre diversidad esperada y observada. .... | 75 |
| <b>Figura 12.</b> Interpolación de la riqueza, índices de Shannon-Weiner y distribución de las especies <i>Bursera bipinnata</i> y <i>Bursera copallifera</i> en las 54 unidades muestrales. ....                                                       | 77 |

|                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 13.</b> Localización del área de estudio, en la microcuenca hidrográfica Agua Escondida, Puebla, México. ....                                                                                                                                   | 93  |
| <b>Figura 14.</b> Ubicación de los 100 árboles de copal en el área de estudio. ....                                                                                                                                                                       | 97  |
| <b>Figura 15.</b> Relación entre mtry y la tasa de error OOB. ....                                                                                                                                                                                        | 103 |
| <b>Figura 16.</b> Relación entre ntree y la tasa de error OOB. ....                                                                                                                                                                                       | 103 |
| <b>Figura 17.</b> Valor de la Disminución media de la precisión y disminución media de Gini de los cuatro descriptores más importantes del modelo final. ....                                                                                             | 105 |
| <b>Figura 18.</b> Gráfica de dependencia parcial para el modelo explicativo de producción de resina de copal con categoría “baja”, “media” y “alta” en función de la condición, diámetro del tallo, altura total y diámetro de la rama secundaria 2. .... | 106 |

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme cumplir cada una de mis metas propuestas, por darme la gran familia que tengo y dejarme vivir a lado de toda la gente que aprecio y amo.

A mis padres, Floralba y José por ser el pilar más importante en mi vida, los que con su apoyo incondicional han guiado mi camino, ofreciéndome sus sacrificios, trabajo y su infinito amor en todo momento.

A Tovi con todo mi amor, por la gran confianza que has puesto en mí, por motivarme a ser mejor persona, gracias por tus valiosos consejos, por escucharme, por tu comprensión, tu apoyo y tu amor incondicional.

A mis hermanos Osvaldo y Daniel, por todos los momentos compartidos y el gran apoyo que me han brindado.

A la familia que formé en Chapingo por sus incontables muestras de cariño. A Claudio por orientarme en los primeros pasos hacia el posgrado, a Esme por sus valiosos consejos para salir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

A la **Universidad Autónoma Chapingo (UACH)**, mi Alma Mater.

A la **Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible**, por su valioso apoyo para culminar mi formación profesional.

A la Dra. **Rosa María García Núñez**, por su apoyo y dirección de la presente investigación.

Al Dr. **Julio César Buendía Espinoza**, por su asesoría y observaciones realizadas para la elaboración de la presente investigación.

Al Dr. **Alejandro Sánchez Vélez**, por su amabilidad y su grandioso aporte para lograr esta meta más en mi vida.

A las personas del **ejido de San Juan Raboso y los Amates**, por su apoyo y sus preciados conocimientos y experiencias que permitieron la realización de esta investigación, con especial atención al sr. Rosendo Ortega León, sr. Amando Herrera Navarro y al sr. Atilano Chávez Herrera.

## DATOS BIOGRÁFICOS

### Datos personales

Nombre: Selene del Carmen Arrazate Jimenez

Fecha de nacimiento: 13 de enero de 1996

Lugar de nacimiento: Venustiano Carranza, Chiapas

CURP: AAJS960113MCSRML04

Profesión: Ingeniera agrónoma especialista en fitotecnia

Cédula profesional: 11973549



### Desarrollo académico

**Bachillerato:** Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 46 Dr. Belisario Domínguez Palencia, Venustiano Carranza, Chiapas.

**Licenciatura:** Ingeniería Agronómica Especialista en Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México.

**Posgrado:** Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México.

## <sup>1</sup>RESUMEN GENERAL

### **Diversidad ecológica y propuesta de aprovechamiento sustentable del copal (*Bursera* spp.) como árbol de usos múltiples**

El bosque tropical caducifolio se caracteriza por la gran diversidad de especies de uso múltiple que pueden ser usadas como alternativa económica sustentable. Entre estas especies destaca la resina aromática del copal, un producto forestal no maderable la cual representa una fuente importante de ingresos económicos con un apego cultural y religioso para muchas comunidades. Los árboles de copal que abundaban en el bosque tropical caducifolio gradualmente han ido desapareciendo por el aumento del número de copaleros, la demanda y necesidad de la gente del campo. La investigación se realizó en la localidad de San Juan Raboso, Izúcar de Matamoros, Puebla, con el objetivo de estimar la diversidad ecológica y evaluar las características morfológicas de los árboles aprovechados como base para promover un adecuado aprovechamiento. Los resultados son presentados en tres capítulos: Caracterización socioeconómica y biofísica de la Microcuenca Agua Escondida; Composición y diversidad de especies en población natural sujeta a extracción de copal; y Modelo explicativo para el aprovechamiento sustentable de resina de copal. Para el primer capítulo se realizó revisión bibliográfica y se elaboraron mapas de fisiografía, clima, áreas de influencia climática y uso de suelo y vegetación. En el segundo se determinó el índice de valor de importancia y la diversidad mediante el índice de Shannon & Wiener ( $H'$ ). En el tercer capítulo se determinaron las variables dasométricas de los árboles de copal que explican directamente una abundancia de resina buena, regular o baja. Los resultados muestran una diversidad media debido a la baja riqueza de especies y a las diferentes abundancias encontradas entre ellas causado por la fuerte presión que se ejerce sobre el área de estudio, como la sobreexplotación del copal. La condición, diámetro principal y altura del árbol son las principales variables que influyen en la producción de resina, las cuales deben considerarse para su buen aprovechamiento.

**Palabras clave:** aprovechamiento sustentable, bosque tropical caducifolio, producto forestal no maderable.

---

<sup>1</sup> Tesis de Maestría en Ciencias, Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Selene del Carmen Arrazate Jimenez

Director de Tesis: Dra. Rosa María García Núñez

## <sup>2</sup>GENERAL ABSTRACT

### **Ecological diversity and proposal for the sustainable use of copal (*Bursera* spp.) as a multipurpose tree.**

Tropical deciduous forest is characterized by the great diversity of multipurpose species that can be used as a sustainable economic alternative. Among these species, the aromatic resin of copal, a non-timber forest product which represents an important source of economic income with a cultural and religious attachment for many communities stands out. The copal trees that were abundant in the tropical deciduous forest have gradually disappeared due to the increase in the number of copal harvesters and the demand and need of the people of the countryside. The research was carried out in the town of San Juan Raboso, Izúcar de Matamoros, Puebla, with the aim of estimating ecological diversity and evaluating the morphological characteristics of the trees used as a basis to promote an adequate use. The results are presented in three chapters: Socioeconomic and biophysical characterization of the Agua Escondida Microbasin; Composition and diversity of species in the natural population subject to copal extraction; and explanatory Model for the sustainable use of copal resin. For the first chapter, a bibliographic review was carried out and maps of physiography, climate, areas of climate influence and land use and vegetation were prepared. In the second one, the importance value index and diversity were determined using the Shannon & Wiener index ( $H'$ ). In the third chapter, the dasometric variables of copal trees were determined; these variables explain directly a good, regular or low resin abundance. The results show an average diversity due to the low richness of species and the different abundances found among them caused by the strong pressure exerted on the study area, such as the overexploitation of copal. The condition, main diameter and height of the tree are the main variables that influence resin production that must be considered for its proper use.

**Keywords:** sustainable use, tropical deciduous forest, non-timber forest product.

---

<sup>2</sup> Thesis, Universidad Autónoma Chapingo.  
Author: Selene del Carmen Arrazate Jimenez  
Advisor: Dra. Rosa María García Núñez

## **1 INTRODUCCIÓN GENERAL**

El bosque tropical caducifolio es uno de los ecosistemas de nuestro país que ha sido relegado principalmente por la poca aportación de productos maderables industriales. Sin embargo, esta comunidad vegetal se caracteriza por la diversidad de especies arbóreas y arbustivas, y se desconoce las bondades que representa en el aporte a los productos forestales no maderables (PFNM). De esta manera, existe una diversidad y potencial de especies de uso múltiple que pueden ser utilizadas como alternativa económica sustentable para los habitantes de estas regiones (García et al., 2014).

Los productos forestales no maderables representan una fuente de ingresos económicos y un apego cultural y religioso para muchas comunidades a lo largo del país. Entre los principales destaca la resina de pino, látex, ceras, fibras, tierra de monte, plantas medicinales, gomas y la resina aromática del copal, entre otros.

Existe una diversidad de métodos de aprovechamiento de los PFNM que van desde aquellos donde las plantas sobreviven hasta otros donde se provoca la muerte del espécimen. En muchos de los casos el aprovechamiento es terminal, es decir, aunque solo se aproveche una parte de la planta, el método de recolección o el valor de la parte aprovechada impide que la planta sobreviva (Torres-Rojo, 2004), un ejemplo claro es la vara de perlilla la cual debe aprovecharse en una etapa fenológica determinada y aprovechar un porcentaje específico para evitar la muerte de la planta. Por su parte, el musgo debe ser aprovechado siguiendo una metodología específica para asegurar su regeneración (Anastacio-Martínez et al., 2016). En otros casos, se emplean métodos de extracción a vida o media vida como en la resina de pino, látex, gomas y la resina aromática del copal, entre otros, sin embargo, en algunos casos la forma de recolecta pone en riesgo la conservación de la planta en el largo plazo. Esto generalmente sucede por el desconocimiento de técnicas apropiadas de extracción y de la respuesta fisiológica de las especies

aprovechadas, por lo que, en el proceso de recolecta se deben considerar prácticas que promuevan la conservación de las especies (Torres-Rojo, 2004).

El copal (*Bursera* spp.) es una planta característica del bosque tropical caducifolio, de la cual se extrae una resina aromática también denominada copal, la cual es utilizada desde hace muchos años, por muchas comunidades con fines religiosos (Espinosa et al., 2008). Los copales se clasifican dentro de la familia Burseraceae, específicamente dentro del género *Bursera*, que se caracterizan por la producción de resinas aromáticas. Hoy día el copal se sigue utilizando, sin embargo, Linares y Bye (2008) mencionan que los bosques donde antes abundaban los árboles de copal están desapareciendo, debido a que ha ido en aumento el número de copaleros por la demanda y la necesidad de la gente del campo. Por tal motivo, en algunas ocasiones no dejan descansar a los árboles el tiempo suficiente por lo que llegan a debilitarse, o se provoca la muerte de alguna de sus partes o la muerte total del árbol.

En la región de Izúcar de Matamoros Puebla la demanda de esta resina ha ocasionado una sobreexplotación de los árboles de copal que se desarrollan en su área de distribución natural, por lo que se deben de buscar alternativas de aprovechamiento sustentable que proporcionen elementos clave para la conservación de la especie, y genere ingresos económicos a las comunidades.

Los sistemas agroforestales desarrollan un papel significativo dentro de la conservación de la diversidad biológica y podrían ofrecer una alternativa viable de producción y conservación en este tipo de árboles de uso múltiple, al incorporarlos como componentes en algún tipo de tecnología agroforestal. Sin embargo, se carecen de estudios donde se consideren las características de desarrollo natural de la especie y la morfología del arbolado explotado que permita su conservación. Por lo que la finalidad de esta investigación es estimar la diversidad ecológica de una población de desarrollo natural del copal, así como evaluar las características morfológicas de los árboles aprovechados como base propiciar un aprovechamiento adecuado de la especie que permita su conservación.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Estimar la diversidad ecológica de una población de desarrollo natural del copal (*Bursera* spp.) así como evaluar las características morfológicas de los árboles aprovechados como base para propiciar un adecuado aprovechamiento que permita su conservación.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar la Microcuenca Agua Escondida mediante consultas bibliográficas y la elaboración de mapas para identificar las condiciones en las que se distribuye la especie en el área.
- Evaluar la composición y diversidad de especies en una población natural sujeta a extracción de copal a través del índice de valor de importancia y de diversidad para conocer el papel que juegan las especies productoras de copal dentro de la comunidad vegetal.
- Determinar las variables dasométricas y de condición de los árboles de copal que explican una abundancia de resina buena, regular o mala a través de un modelo explicativo para un adecuado aprovechamiento.

### **3 REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1 Bosque Tropical Caducifolio**

El bosque tropical caducifolio (BTC) es una de las biotas más representativas del país (Guízar y Sánchez, 1991). Rzedowski y Calderón de Rzedowski (2013) lo definen como un conjunto de comunidades vegetales de porte bajo que se desarrollan en áreas de clima cálido, pero con precipitaciones concentradas en alrededor de seis meses al año. Mencionan que este tipo de vegetación se encuentra presente en el Centro y Sudamérica, pero es en México donde se encuentra mayormente representada y con una gran cantidad de endemismos.

En México, la mayor presencia del BTC se encuentra en el Alto Balsas, pero también es propio de la vertiente del pacífico y de la depresión central de Chiapas formando una parte de la cuenca del río Grijalva. La vertiente atlántica también se ve cubierta por este tipo de vegetación, aunque en menor superficie, y ocupa la mayor parte del estado de Yucatán. Se caracteriza por la presencia de especies que tiran sus hojas en la época seca del año, y generalmente se distingue de los demás tipos de vegetación gracias a su fenología, fisionomía, composición florística y requerimientos ecológicos. Se desarrolla en México entre 0 y 1900 msnm y temperatura media anual de 20° C a 29°C (Guízar y Sánchez, 1991). Las regiones donde se encuentra este tipo de vegetación presentan dos estaciones bien definidas de disponibilidad de humedad: la lluviosa y la seca (Rzedowski, 2006) con aproximadamente 7.2 meses secos y 5.5 meses húmedos al año (Trejo y Dirzo, 2002). Prospera en rangos de precipitación muy amplios que van de los 300 a los 1800 mm, aunque con mayor frecuencia entre los 600 y 1200 mm, sin embargo, la precipitación se considera baja debido a la alta tasa de evapotranspiración. Los suelos presentan buen drenaje con características derivadas de la roca madre, que puede ser tanto ígnea como metamórfica (Rzedowski, 2006).

El estudio realizado por Guízar y Sánchez (1991) sobre el BTC, describe la composición florística del Alto Balsas Poblano, y mencionan que en las partes

más altas de los cerros se encuentran en menor frecuencia, encinares y palmares, constituidos por especies como *Quercus glaucooides*, mezclado de vez en cuando con *Q. castanea*. Por otra parte, los palmares están conformados por *Brahea dulcis* y *B. dulcis f. humilis*. En altitudes menores se puede apreciar especies como *Acacia pennatula*, *Wimmeria pubences*, *Mimosa benthami*, *Hauya elegans* spp, *Acacia coulteri* y *Bursera* spp. Las asociaciones del género *Bursera* las conforman *B. morelensis*, *B. fagaroides*, *B. áptera*, *B. lancifolia* y *B. schlechtendalii* y junto con el cuajotal se aprecian los copales, *Bursera vejar-vazquezii*, *B. bipinnata*, *B. submoniliformis* y *B. copallifera*. En las partes bajas de los cerros y a orillas de los cauces se observan otros elementos florísticos del BTC, tales como *Hauya elegans ssp barcenae*, *Euphorbia fulva*, *Cedrela salvadorensis*, *Bursera vejar-vazquezii*, *Sideroxylon capiri*, *Lasiacis divaricata*, *Ceiba parviflora*, entre otras.

Es claro que la diversidad florística del BTC es bastante alta, lo que tiene una crucial implicación en cuanto a su protección. Las diferentes dimensiones sobre la gran diversidad florística, así como sus altos niveles de endemismos y las actuales amenazas a su supervivencia debido a los patrones de uso del suelo constituyen claramente un tema de preocupación para la conservación de la biodiversidad (Trejo y Dirzo, 2002) al ser esta una fuente importante de recursos forestales maderables y no maderables de los que la población hace uso y satisface sus necesidades básicas (Anta et al., 2008).

### **3.2 Productos forestales no maderables (PFNM)**

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los productos forestales no maderables (PFNM) son bienes derivados de los recursos forestales no maderables (RFNM), de los cuales se puede obtener alimentos, forrajes, combustible, resinas y medicinas, entre otros, que permiten cubrir las necesidades de los habitantes locales (FAO, 1992). Proviene de una variedad de recursos de diversos ecosistemas, incluyendo aquellos que no tienen estructura forestal (sabanas y desiertos), así como de sistemas agroforestales e incluso huertos y jardines domésticos; sin

embargo, no incluye plantaciones de árboles de una sola especie. Se les ha definido de distintas formas, aunque en general existe el consenso de que el término PFNM se refiere a todos los productos biológicos que se explotan con fines utilitarios, excluyendo la madera en rollo (Stockdaley et al., 2019).

Torres-Rojo (2004) define a los PFNM como aquellos que se obtienen de especies vegetales, animales y hongos provenientes de terrenos forestales. Los cuales han constituido una parte importante de la economía forestal de los países en vías de desarrollo. Para comprender adecuadamente el término y la clasificación de los PFNM es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones tales como la procedencia de los productos, la parte de la planta del que se obtiene el producto, las características físicas y químicas, y sus usos (Chandraekharan et al., 1996).

Los PFNM siempre han constituido una parte esencial en la economía de los países en vías de desarrollo (Alexiades y Shanley, 2004). En México, se usan alrededor de 1000 productos forestales no maderables, entre los que destacan las gomas, ceras, fibras, tierra de monte y cortezas, entre otros. Para muchas comunidades tales productos llegan a representar la fuente más importante de ingresos, debido a las características propias de los recursos forestales no maderables el cual puede presentarse como una alternativa económica sustentable (Tapia-Tapia y Reyes-Chilpa, 2008).

Dado a los usos extraordinariamente variados de los PFNM, utilizados con fines prácticos, laborales, rituales, etc., son aprovechados para elaborar alimentos, vestimenta y utensilios, entre otros. Algunos se consumen de manera directa sin ningún procesamiento y algunos otros pasan por una serie de procesos de transformación (Stockdaley et al., 2019). Lo que refleja la gran importancia de los PFNM, no solo en satisfacer las necesidades de sobrevivencia, sino que representa un acervo cultural y social muy apreciado por los habitantes de las comunidades locales (Torres-Rojo, 2004).

### **3.2.1 Aprovechamiento de los productos forestales no maderables**

Desde la antigüedad hasta hoy en día el aprovechamiento de los PFNM se ha hecho con fines de satisfacer las necesidades de los habitantes de las comunidades locales. Hasta hace poco con fines comerciales. Sin embargo, aunque la mayoría de los productos no pertenecen a un mercado formal, el valor económico de estos puede exceder al de los productos forestales maderables (Chandraekharan et al., 1996).

Su denominación como productos forestales “menores” manifiesta el relativo descuido al que han estado sujetos desde hace muchos años. El grupo taxonómico, tipo de producto, sistema de producción o región son factores que influye sobre la disponibilidad de este tipo de productos. La parte de la planta cosechada es uno de los factores determinantes en cuanto al impacto de la cosecha sobre la especie. El aumento en los niveles de cosecha a menudo trae consigo una merma en la disponibilidad del PFNM, especialmente en el caso de especies poco abundantes, de crecimiento lento y/o con requerimientos ecológicos muy específicos. Como respuesta a la escasez, los extractores de la materia prima, como en el caso de la resina de copal, tienen que viajar distancias cada vez mayores para alcanzar nuevas poblaciones del recurso. O bien, se recurre a la sustitución simultánea o en serie de las especies, por ejemplo, más de la mitad de cajas supuestamente hechas con lináloe (*Bursera aloexylon*) en Olinalá, Guerrero, México, están elaboradas con la madera de pino. La sustitución se lleva a cabo por los mismos productores (Alexiades y Shanley, 2004).

La intensificación del sistema productivo también es una respuesta ante la escasez del recurso. Muchas de las especies cultivadas, como la pimienta gorda en México, o la resina de pino en Cuba están asociadas a usos industriales. Cuando el cultivo se propone como alternativa a la sobreexplotación, se debe tener en cuenta el impacto sobre aquellos extractores sin tierras que dependen del extractivismo. Y en aquellos casos donde sea posible establecer sistemas de producción intensivos, todavía queda

la incertidumbre que estos puedan coadyuvar a la conservación de los bosques (Alexiades y Shanley, 2004).

Sin embargo, en la actualidad el aprovechamiento de los PFSM puede ocasionar pérdidas ecológicas de las poblaciones nativas, por lo que es necesario recurrir a opciones de conservación que promuevan el uso adecuado de los ecosistemas. Un primer paso que se ha dado para conocer las implicaciones del aprovechamiento basado en el manejo de especies son los estudios sobre las características de las poblaciones. No obstante, debe involucrarse otros aspectos importantes como los factores sociales y culturales presentes en las comunidades de donde se aprovecha el recurso (López, 2008).

Torres-Rojo (2004) señala que existe una gran diversidad de formas de aprovechamiento de los PFSM, los cuales permiten darse cuenta de que una sola especie puede proporcionar más de un tipo de producto forestal no maderable. El aprovechamiento puede incluir solo una parte de la planta y debido a la importancia de la parte cosechada o a la forma del aprovechamiento se puede causar daño severo o la muerte de esta. Mientras que algunas ocasiones la forma de recolecta puede interferir en la capacidad de reproducción de la especie en el mediano o largo plazo, esto debido a alteraciones en su hábitat o al inadecuado aprovechamiento, ya que, en la mayoría de los casos, el aprovechamiento de los PFSM no se planea adecuadamente y no se proponen alternativas de manejo que proteja a las especies.

Queda claro que dentro de los aspectos que han obstaculizado a que se presente un adecuado aprovechamiento de los PFSM se encuentra: la falta de conocimiento sobre la utilización de los recursos; la poca valorización de los PFSM; la nula comprensión de la importancia de estos productos por parte de las comunidades locales; la preferencia por productos que demandan una elaboración más compleja con tecnología avanzada; su sustitución por productos sintéticos y la falta de capacitación (FAO, 1992). Es decir, los PFSM

fueron dejados de lado y no se les dio la importancia que merecen como parte del conocimiento tradicional presente en muchas regiones de México (Torres-Rojo, 2004).

### **3.3 Copal**

En México se le llama copal a una resina aromática que es usada como incienso, que al quemarse desprende un olor fragante. La resina de copal se obtiene de árboles clasificados dentro del género *Bursera* de la familia Burseraceae, característicos del bosque tropical caducifolio. En México están presentes alrededor de 100 especies de *Bursera*, la mayor presencia se concentra en el estado de Guerrero, Michoacán y Oaxaca (Espinosa et al., 2008).

Existen muchas resinas denominadas como copal, sin embargo, las especies del género *Bursera* son las comúnmente usadas como incienso. La resina de copal también puede reconocerse con el nombre de copal virgen, copal santo, tecomaca y almárciga, entre otros. Se conocen tres tipos de resina de copal: el copal blanco lechoso, el copal amarillo transparente y el copal negro o gris. Es probable que la especie y forma de recolección influyan en la obtención de los tipos de copal (Purata y León, 2005).

#### **3.3.1 Importancia cultural del copal**

La resina de copal es usada desde hace miles de años en rituales religiosos, y desde la antigüedad era considerada como un dios protector. Existen libros llamados códices que presentan la forma de vida de los antiguos pueblos y en sus imágenes se logra distinguir a sacerdotes ofrendando copal (Purata, 2008a). La gran importancia del copal se puede dar a conocer por medio del gran número de incensarios encontrados en Palenque, Chiapas, México, así como de ofrendas con figuras hechas de copal en el Templo Mayor de Tenochtitlán, el centro histórico de la ciudad de México y en cenotes sagrados de los mayas (Purata y León, 2005).

A lo largo de los años el copal se ha incorporado en muchas actividades y celebraciones, por ejemplo, se usa en ritos católicos todo el año y en celebraciones agrícolas de distintos grupos étnicos (Cruz et al., 2006). Actualmente es ampliamente utilizado para las celebraciones del día de muertos, en los funerales y en fiestas patronales, también se usa para limpiezas y curaciones o preparar remedios contra enfermedades (Purata y León, 2005). Su importancia continúa en las celebraciones del baño de temazcal en donde usa el copal para sahumar a las personas antes de entrar al baño, y en las iglesias católicas se tiene la creencia de quemar el copal como purificador (Linares y Bye, 2008).

### **3.3.2 Características morfológicas de las especies productoras de resina de copal**

La familia Burseraceae agrupa árboles y arbustos deciduos o perennifolios y corteza con conductos resiníferos y laticíferos. Es una familia con 18 géneros y cerca de 600 especies en el mundo, nueve géneros y 240 especies en América, tres géneros y cerca de 110 especies en México. Los géneros más diversos son: *Bursera* (100 spp.), *Cannarium* (77 spp.), *Commiphora* (190 spp.) y *Protium* (80 spp.).

El género *Bursera* incluye árboles y arbustos generalmente deciduos, con troncos de corteza externa exfoliante, rojiza a amarillenta como los cuajotes, que se desprende en láminas grandes o pequeñas; la corteza interna con tonos de verde muy diversos o corteza no exfoliante, lisa y gris como los copales con resinas aromáticas; frecuentemente con ramas cortas, catafilos generalmente conspicuos característicos de la sección *Bullockia* o inconspicuos como la sección *Bursera* (Medina-Lemos, 2008).

De acuerdo con la secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se explotan más de 20 especies para el aprovechamiento del copal, entre las que destacan el copal chino o santo aprovechadas de *Bursera bipinnata* y copal ancho extraída de la especie *Bursera copallifera* (SEMARNAT,

2018). La especie *Bursera bipinnata* se encuentra en los estados de Aguascalientes, Chiapas, Colima, Durango, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Veracruz y Zacatecas. Frecuente en la zona de transición entre bosque de *Quercus-Pinus* y el bosque tropical caducifolio. En elevaciones de 800-1600 m, su floración es entre mayo y junio y su fructificación de junio a octubre (Medina-Lemos, 2008).

Es una especie que puede alcanzar hasta 4 m de altura y diámetro normal hasta 12 cm, y ramificado. La corteza externa es de color café claro a grisácea y la corteza interna es rosada. Esta especie produce un exudado aromático. El grosor de la corteza es de 3 mm. Las hojas están dispuestas en espiral, bipinnadas, agrupadas en ramillas secundarias, compuestas por 11 pares de folíolos primarios opuestos, cada uno con 5 o 6 pares de folíolos secundarios opuestos (Guízar y Sánchez, 1991). Las hojas son generalmente imparipinnadas, peciolo hasta 1.5-3.0 cm largo, vilosos; láminas 2.0-7.0 cm largo, 1.5-4.5 cm ancho, ovadas u obovadas en contorno general, raquis alado, ala hasta 1.0 mm ancho de cada lado, margen entero, peciólulo hasta 1.0 mm largo, folíolos (3) 5-7, 0.5-2.5 cm largo, 0.4-1.5 cm ancho, ovados a elípticos, el terminal a veces subróbico y mayor que los laterales, base cuneada a truncada u oblicua, ápice agudo a redondeado, margen totalmente crenado-serrado o doble crenado-serrado regular a irregularmente, membranáceos a cartáceos, haz vilosa con tricomas esparcidos, envés densamente viloso o tricomas sólo en las nervaduras y nervaduras conspicuas (Medina-Lemos, 2008).

Inflorescencias paniculadas, pubérulas, bracteolas subuladas, pedicelos de 1 a 2 mm de largo. Con flores masculinas tetrámeras, lóbulos del cáliz triangulares, pubérulos en ambas caras, pétalos de color blanquecinos a amarillentos o verdosos, oblanceolados, cuculados e incurvados en el ápice. Las flores femeninas son tetrámeras, a veces con los pétalos un poco más cortos que los lóbulos del cáliz, ovario bilocular, glabro, con presencia de dos estigmas. Las infrutescencias presentan uno o varios frutos bivalvados, glabros, con hueso

comprimido y casi totalmente recubierto por un pseudoarilo rojo en la madurez, y la parte expuesta negra (Rzedowski et al., 2004).

Otra especie de la que se extrae la resina aromática copal es *Bursera copallifera*, el cual se encuentra en los estados de Colima, Guerrero, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla y Zacatecas, sin embargo, esta especie es más abundante en la cuenca del Balsas. Habita en el Bosque tropical caducifolio y zona de transición del mismo con el bosque de Quercus. En elevaciones de 1640-1900 m. su floración se presenta de abril a mayo y la fructificación de junio a noviembre (Medina-Lemos, 2008). Esta especie se caracteriza por ser un árbol de hasta 7 m de altura con diámetro normal de 28 cm, y muy ramificado. Su corteza externa es lisa a escamosa en árboles adultos, de color rojizo a grisáceo y con exudado resinoso aromático. Presenta hojas dispuestas en espiral imparipinnada y aglomerada en el extremo de las ramillas, elípticas, con margen crenado y ápice agudo. El haz es de color verde oscuro y el envés de color amarillento; presenta raquis alado. Con cápsulas trivalvadas, oblongas, de color café rojizo y agrupados en racimos. La madera es de color blanco (Guízar y Sánchez, 1991).

### **3.3.3 Diversidad ecológica de los sitios donde se extrae el copal**

La distribución del género *Bursera* se restringe al continente americano. Se extiende desde los extremos suroeste y sureste de los Estados Unidos hasta el norte de Perú y Brasil, y su centro de diversidad se localiza en México (Rzedowski et al., 2004). La mayor parte de las especies de *Bursera* habitan en el bosque tropical caducifolio de México. En estos bosques las especies de *Bursera* son dominantes del estrato arboreo, junto con algunas especies de leguminosas. Sólo unas pocas especies son arbustos y generalmente habitan en el matorral xerófilo (Medina-Lemos, 2008). De acuerdo con Hernández-Pérez et al. (2011) en el estado de Morelos, estas especies presentan la distribución más amplia dentro de la selva baja caducifolia, debido a que en su distribución inciden tanto factores ecológicos, así como el factor antropocéntrico.

En el estado de Puebla, especialmente en la mixteca poblana el bosque tropical caducifolio es de gran relevancia. Es la vegetación en donde la presencia de lluvias es escasa y las especies necesitan adaptarse a un alto déficit hídrico, por lo que predominan árboles con presencia de vasos laticíferos o de canales resiníferos ya que con la presencia de ceras o aceites las especies tratan de obstruir las aperturas estomatales y evitar parcialmente la evapotranspiración. Es importante mencionar que las variables climáticas suelen ser las de mayor peso al momento de determinar la distribución y abundancia de las especies, entre los más sobresalientes en la distribución del género *Bursera* son la temperatura y la precipitación, por lo que se debe considerar estas y algunas otras variables de interés para entender el comportamiento de las especies (Guízar y Sánchez, 1991).

En la mixteca poblana la resina más importante es la denominada copal, extraída de las especies *B. bipinnata* y *B. copallifera*. Algunas especies que se encuentran conviviendo con el género *Bursera* son *Styphnolobium burseroides*, *Ceiba aesculifolia*, *C. parviflora*, *Conzattia multiflora*, esto cuando el sitio ha sido poco perturbado. También se puede encontrar plantas epífitas en barrancas y lugares propicios. Se hacen presentes cactáceas columnares y candelabroiformes y géneros como *Neobuxbaumia*, *Lemairoocereus*, *Opuntia*, *Ferocactus* y *Agave*. En ciertas áreas se encuentran *Lemairoocereus* o *Neobuxbaumia* haciendo asociaciones con algunas especies del género *Bursera*. También es posible encontrar *Yucca periculosa*, *Agave kichneriana* (Guízar y Sánchez, 1991). Otra especie muy importante y también perteneciente al género de los copales es el lináloe (*Bursera aloexylon*), especie aromática y predominante en el bosque tropical caducifolio (Hersch-Martínez y Glass, 2006).

Las comunidades en donde se desarrollan las especies productoras de copal están siendo gravemente afectadas. Generalmente, los árboles de copal son de propiedad comunitaria, lo que conlleva a ciertos problemas. Por ejemplo, si los árboles han sido trabajados recientemente, se tienen que dejar tiempo de

descanso. Según don Francisco Vega, copalero experimentado de Teotlalco, Puebla, México, los copales cuando menos deben descansar dos años para que se pueda asegurar el aprovechamiento en el largo plazo. La alteración del bosque tropical caducifolio en la mixteca poblana ha provocado que los bosques donde antes abundaban los árboles de copal estén desapareciendo, esto debido al inadecuado aprovechamiento que origina la demanda del producto y el aumento en el número de copaleros (Linares y Bye, 2008).

### **3.4 Aprovechamiento sustentable del copal**

Para realizar el aprovechamiento de un recurso se debe tener en cuenta algunas consideraciones, entre ellas la parte de la planta a utilizar, la cantidad de la extracción y la forma de hacer el aprovechamiento. Es de suma importancia tener en cuenta que lo que se busca al manejar un recurso es reducir el impacto negativo tanto en el recurso como en lo que lo rodea (Purata, 2008b).

La sobrevivencia de una población se pone en peligro cuando se realizan extracciones inadecuadas del producto (Anta et al., 2008). El daño causado se ve reflejado en el mediano o largo plazo, cuando el recurso está por desaparecer. Sin embargo, una manera segura de conocer si se está afectando al recurso es por medio de la regeneración, por lo que se debe procurar realizar monitoreos constantes y si este indica que hay afectaciones al recurso, es necesario detener el aprovechamiento y después tomar las medidas necesarias para minimizar el daño, y de esta forma se podría seguir aprovechando en un futuro de forma sustentable (Purata, 2008b).

El principal obstáculo para que no se realice un adecuado aprovechamiento del recurso es la carencia de información sobre las especies, seguido de la falta de aplicación de la información en especies que si existe. Sin embargo, en ciertos lugares si se toman algunas medidas para tratar de realizar un adecuado aprovechamiento, por ejemplo, en San Miguel Maninaltepec, Oaxaca, México cuentan con un sistema de extracción de copal basados en su forma de

producción y controlando el acceso al recurso. Por medio de una asamblea se decide dejar descansar a los árboles durante uno o dos años, y el método de extracción que se realiza en la comunidad no afecta la regeneración de la especie, es así como la gente se beneficia de esta resina, pero sin causar daño a los árboles (Anta et al., 2008).

Es importante considerar que para lograr que se realicen aprovechamientos sustentables se debe considerar tanto las diferentes condiciones que influyen en este, así como factores de comercialización y organización que promuevan que las estrategias de manejo funcionen adecuadamente trabajando la sociedad en conjunto (Anta et al., 2008). Además, existen normas que regulan el aprovechamiento de los recursos forestales no maderables, por ejemplo, cuando las personas de una comunidad que desean aprovechar el copal en terrenos comunales o ejidales para fines de consumo familiar o venta a pequeña escala únicamente se requiere solicitar permiso al comisariado o encargado local. Pero si se desea realizar el aprovechamiento para venta a mayor escala se debe solicitar un permiso que otorga la SEMARNAT. Es importante que los interesados en aprovechar el recurso conozcan a profundidad el proceso que debe llevarse a cabo para que el aprovechamiento se realice de forma eficiente y sustentable (Sierra y Purata, 2008).

#### **3.4.1 Sobreexplotación del copal**

Los recursos naturales del bosque tropical caducifolio están presentando una gran pérdida de su biodiversidad. Entre los factores que lo ocasionan se encuentra la erosión del hábitat causado por el sobrepastoreo de ganado, la sobreexplotación de especies maderables y el inadecuado manejo de los recursos característicos de este ecosistema (Cruz et al., 2006).

El copal es uno de los recursos mayormente afectados, ya que se hacen extracciones de resina muy frecuentemente, y en respuesta el árbol produce más haciendo uso de los nutrientes y energía que debería usar en actividades de crecimiento y recuperación. El árbol de copal es afectado fuertemente

cuando se realizan muchos cortes y además si estos son muy profundos. La consecuencia del mal manejo se refleja en la pérdida de vigor, incluso los árboles se secan si la extracción de la resina se realiza en temporada de secas o si no se dejan descansar a los árboles lo suficiente (Purata, 2008b). Cruz et al. (2006) hacen referencia a Pitzotlán, Morelos donde la vegetación ha cambiado drásticamente por causa de la actividad humana y el copal ha sido afectado en gran medida, ya que además de que la población de árboles de copal que se encuentran en estado de producción ha disminuido considerablemente, los árboles de corta edad tienen poca presencia y la regeneración está siendo gravemente afectada por el sobrepastoreo.

Se le suma el aumento de la población y la demanda de la gente del campo, lo que trae como consecuencia que no dejen descansar lo suficiente los árboles de copal y estos se secan y se mueren, ocasionando una sobreexplotación (Linares y Bye, 2008).

### **3.4.2 Conservación natural del copal**

Al momento en que se empiezan a observar cambios en el ecosistema se debe de ayudar a minimizar los daños ocasionados por la sobreexplotación de los recursos, ya que si no se hace de esta manera en un futuro será más difícil recuperarlos. Para ayudar a disminuir el impacto causado a los copales se debe comenzar con dejar más árboles sin extraer resina ya que entre más tiempo descansen estos árboles más rápidamente se recuperarán (Hernández y Sierra, 2008).

Es importante incluir a los habitantes de las comunidades en donde se extrae la resina de copal para que colaboren en su conservación, ya que son ellos los que tienen el conocimiento ecológico tradicional y la forma de traspasar estos conocimientos de generación en generación (Cruz et al., 2006). Otra forma importante de facilitar la recuperación de la especie se puede hacer a través de la incorporación de algunas plantas que promuevan la abundancia de la especie afectada o bien, aumente la de otras. Se trata de plantas que creen un

microambiente que favorezca el crecimiento de árboles de copal y mantenga las condiciones originales del ecosistema. De esta forma en un futuro se podría garantizar su aprovechamiento (Hernández y Sierra, 2008).

### 3.5 Literatura citada

- Alexiades, M.N. y Shanley, P. (2004). *Productos forestales, medios de subsistencia y conservación. Estudios de caso sobre sistemas de manejo de productos forestales no maderables*. Centro para la investigación forestal internacional.  
[https://www.cifor.org/publications/pdf\\_files/Books/BAlexiades0701S.pdf](https://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BAlexiades0701S.pdf)
- Anastacio-Martínez, N. D., Franco-Maass, S., Valtierra-Pacheco, E. y Nava-Bernal, G. (2016). Aprovechamiento de productos forestales no maderables en los bosques de montaña alta, centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37) 21-38.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.49>
- Anta Fonseca, S., J.Carabias, et al. 2008. Consecuencias de las políticas públicas en el uso de los ecosistemas y la biodiversidad, en *Capital natural de México*, vol. III: *Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad*. CONABIO, México, pp. 87-153.
- Chandraekharan, C., Frisk, T. y Campos, R. J. (1996). *Desarrollo de productos forestales no madereros en América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Santiago, Chile. <http://infobosques.com/portal/wp-content/uploads/2015/12/FAO.pdf>
- Cruz, L. A., Salazar, M. L. y Campos, O. M. (2006). Antecedentes y actualidad del aprovechamiento de copal en la Sierra de Huautla, Morelos. *Revista de Geografía Agrícola*, (37), 97-115.
- Espinosa, O. D., Montaña, A. G. y Becerril, C. F. (2008). Capítulo 1. ¿Qué son y dónde viven los copales?. En S. E. Purata (Ed.), *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites* (p. 13). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) / Red de Aprendizaje, Intercambios y la Sistematización de Experiencias hacia la Sustentabilidad (RAISES).
- García, N. R. M., Sánchez, V. A., Hernández, M. M. A. y Reséndiz, F. N. S. (2014). Estudio descriptivo de diversidad florística y usos de árboles y arbustos nativos del sureste de Guanajuato. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México*, 2(2), 24-31.
- Guízar, N. E. y Sánchez, V. A. (1991). *Guía para el reconocimiento de los principales árboles del Alto Balsas*. Universidad Autónoma Chapingo. México.

- Hernández, A. M. y Sierra, H. J. A. (2008). Capítulo 10. Restauración. En S. E. Purata (Ed.), *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites* (pp. 46-51). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) / Red de Aprendizaje, Intercambios y la Sistematización de Experiencias hacia la Sustentabilidad (RAISES).
- Hernández-Pérez, E., González-Espinosa, M., Trejo, I. y Bonfil, C. (2011). Distribución del género *Bursera* en el estado de Morelos, México y su relación con el clima. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(3) 964-976. <http://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.3.694>
- Hersch-Martínez, P. y Glass, R. (2006). *Linaloe: un reto aromático. Diversas dimensiones de una especie mexicana, Bursera linaloe*. México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Linares, E. y Bye, R. (2008). El copal en México. CONABIO. *Biodiversitas*, 78, 8-11.
- López, C. R. (2008). Productos forestales no maderables: importancia e impacto de su aprovechamiento. *Colombia Forestal*, 11, 215-231.
- Medina-Lemos, R. (2008). Fascículo 66. Burseraceae. En *Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán* (pp. 1-76). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1992). *Productos forestales no madereros; posibilidades futuras*. Roma, Italia. <http://www.fao.org/3/t0431s/t0431s.pdf>
- Purata, V. S. E. (2008a). Capítulo 2. Algunos usos del copal. En S. E. Purata (Ed.), *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites* (pp. 14-16). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) / Red de Aprendizaje, Intercambios y la Sistematización de Experiencias hacia la Sustentabilidad (RAISES).
- Purata, V. S. E. (2008b). Capítulo 9. El impacto del manejo y los ajustes al aprovechamiento. En S. E. Purata (Ed.), *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites* (pp. 42-45). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) / Red de Aprendizaje, Intercambios y la Sistematización de Experiencias hacia la Sustentabilidad (RAISES).
- Purata, S. E. y León, M. C. (2005). Resina de copal. En C. López, S. Chafón, y G. Segura (Eds.), *La riqueza de los bosques mexicanos: más allá de la madera. Experiencias de comunidades rurales* (pp. 86-91). SEMARNAT, CECADESU, COMISIÓN NACIONAL FORESTAL, PROCYMAF II, CIFOR.
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México (1ª ed. digital). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

- Rzedowski, J. y Calderón de Rzedowski, G. (2013). Datos para la apreciación de la flora fanerogámica del bosque tropical caducifolio de México. *Acta Botánica Mexicana*, (102), 1-23.
- Rzedowski, J., Medina, R. y Calderón de Rzedowski, G. (2004). Las especies de bursera (burseraceae) en la cuenca superior del río Papaloapan (México). *Acta Botánica Mexicana*, (66), 23-151.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (14 de agosto de 2018). *El copal, planta de resinas aromáticas de importancia cultural, económica, social y mística*. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/el-copal-planta-de-resinas-aromaticas-de-importancia-cultural-economica-social-y-mistica>
- Sierra, H. J. A. y Purata, V. S. E. (2008). Capítulo 11. Los permisos de aprovechamiento. En S. E. Purata (Ed.), *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites* (pp. 52-54). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) / Red de Aprendizaje, Intercambios y la Sistematización de Experiencias hacia la Sustentabilidad (RAISES).
- Stockdaley, M., López, Binnqüist, C., Blauert, J., Miranda, J. M., Arancibia, E. y Edouard, F. (2019). *Manejo comunitario sustentable de productos forestales no maderables: un manual para América Latina*. Programa de intercambio de productos forestales no maderables para el sur y sureste de Asia, Centro de investigaciones tropicales de la universidad veracruzana, Red temática Conacyt "Productos Forestales No Maderables: aportes desde la etnobiología para su aprovechamiento sostenible" (Red-PFNM), People and Plants International, Fundación Cordaid.
- Tapia-Tapia, E. C. y Reyes-Chilpa, R. (2008). Productos forestales no maderables en México: Aspectos económicos para el desarrollo sustentable. *Madera y Bosques*, 14(3), 95-112. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1431208>
- Torres-Rojo, J. (2004). *Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020: informe nacional: México*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [https://www.researchgate.net/publication/308141519\\_Rojo\\_Juan\\_Manuel\\_Torres\\_Estudio\\_de\\_tendencias\\_y\\_perspectivas\\_del\\_sector\\_forestal\\_en\\_America\\_Latina\\_al\\_ano\\_2020\\_informe\\_nacional\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/308141519_Rojo_Juan_Manuel_Torres_Estudio_de_tendencias_y_perspectivas_del_sector_forestal_en_America_Latina_al_ano_2020_informe_nacional_Mexico).
- Trejo, I. y Dirzo, R. (2002). Floristic diversity of Mexican seasonally dry tropical forests. *Biodiversity and Conservation*, 11, 2063-20483.

## **4 CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA Y BIOFÍSICA DE LA MICROCUEENCA AGUA ESCONDIDA, PUEBLA**

### **SOCIOECONOMIC AND BIOPHYSICAL CHARACTERIZATION OF THE MICROBASIN AGUA ESCONDIDA, PUEBLA**

**Selene del Carmen Arrazate-Jimenez<sup>1</sup>; Mayra Clementina Zamora  
Elizalde<sup>1</sup>; Rosa María García Núñez<sup>1</sup>; Julio César Buendía Espinoza<sup>1</sup>;  
Alejandro Sánchez Vélez<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, CP 56230 Texcoco, México. Email: [arrazate.jimenez13@gmail.com](mailto:arrazate.jimenez13@gmail.com); [mayracze1@gmail.com](mailto:mayracze1@gmail.com); [blondynunez@gmail.com](mailto:blondynunez@gmail.com); [jcbuendiae@hotmail.com](mailto:jcbuendiae@hotmail.com).*

*<sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, CP 56230 Texcoco, México. Email: [dr.zhivago2014@gmail.com](mailto:dr.zhivago2014@gmail.com).*

#### **4.1 Resumen**

Las microcuencas hidrográficas integran factores biofísicos y socioeconómicos, que permiten conocer sus condiciones y tener una base de soporte técnico como base para la toma de decisiones de los habitantes que usan y transforman sus recursos naturales. Con el objetivo de identificar las condiciones que se presentan en la microcuenca Agua Escondida, se realizó una caracterización socioeconómica a través de consultas bibliográficas en la que se obtuvo información de los aspectos sociales, económicos y productivos

del municipio de Izúcar de Matamoros por ser el que abarca la mayor superficie de la microcuenca. Para la caracterización biofísica, se elaboraron mapas de fisiografía, clima, temperatura, precipitación, áreas de influencia climática y de uso de suelo y vegetación, con apoyo de la herramienta de información geográfica ArcMap 10.8. Se encontró que el 65 % de la población económicamente activa del municipio de Izúcar de Matamoros labora en actividades relacionadas con el comercio y los servicios, y contribuye con el 4 % de la producción agrícola del estado. En la microcuenca predomina la topoforma de la sierra moderadamente escarpada. Predomina la vegetación secundaria arbórea del bosque tropical caducifolio, y la unidad de paisaje sobresaliente es la vegetación secundaria arbustiva del bosque tropical caducifolio. El clima predominante es el perteneciente al grupo semicálido subhúmedo denotado como A (C) w0 (w) (i) g. La temperatura media anual es de 21.2 °C, y la precipitación anual de 806.5 mm.

**Palabras clave:** recursos naturales, conservación, sistemas productivos, especies vegetales.

## 4.2 Abstract

The microbasins integrate biophysical and socioeconomic factors, which make it possible to know their conditions and have a technical support base as a basis for decision-making by the inhabitants who use and transform their natural resources. In order to identify the conditions present in the Agua Escondida microbasin, a socioeconomic characterization was carried out through bibliographic consultations in which information was obtained on the social, economic and productive aspects of the municipality of Izúcar de Matamoros, as it covers the largest surface area of the microbasin. For the biophysical characterization, maps of physiography, climate, temperature, precipitation, areas of climatic influence and land use and vegetation were prepared using the geographic information tool ArcMap 10.8. It was found that 65 % of the economically active population of the municipality of Izúcar de Matamoros works in activities related to commerce and services, and contributes 4 % of the state's agricultural production. The microbasin is dominated by a moderately steep sierra topoform. The secondary arboreal vegetation of the tropical deciduous forest predominates, and the outstanding landscape unit is the secondary shrubby vegetation of the tropical deciduous forest. The predominant climate belongs to the semi-warm sub-humid group denoted as A (C) w0 (w) (i) g. The mean annual temperature is 21.2 °C, and the annual precipitation is 806.5 mm.

**Key words:** natural resources, conservation, productive systems, plant species.

## 4.3 Introducción

La cuenca hidrográfica es un territorio que se caracteriza por que el agua de lluvia que cae en su superficie escurre hacia un cauce común (Sánchez et al.,

2003). Es un mosaico de ecosistemas donde se distinguen vínculos entre territorios de zonas altas y bajas, lo que crea un empalme físico entre comunidades alejadas unas de otras (Cotler, 2010). La cuenca es la unidad de planeación, y la microcuenca es la unidad básica de ordenación e intervención (Sánchez et al., 2003). México posee una gran diversidad ambiental la cual se refleja en la diversidad de formas y tamaños de cada región hidrográfica, donde la estructura particular y las variaciones climáticas de cada una se manifiesta a través de fenómenos geomorfológicos específicos. En estos ambientes, y como resultado de la dinámica poblacional, se perfila una distinción en las actividades productivas (Cotler, 2010). En las cuencas y microcuencas hidrográficas se integran factores biofísicos y socioeconómicos. Los factores biofísicos son el resultado de los elementos físicos y biológicos del medioambiente (Rizo et al., 2011), los cuales permitirán conocer en forma rápida las condiciones de la cuenca, y tener una base de soporte técnico para la toma de decisiones. Mientras que, los factores socioeconómicos son importantes debido a su relevancia a causa de los habitantes que interaccionan con las microcuencas, ya que son los que hacen uso y transforman los recursos naturales (cultivos, ganadería, leña, etc.) para su beneficio y la preservación de estos se ve influenciado con la educación ambiental de los habitantes. Por lo que es importante el trabajo con enfoque de microcuencas, ya que favorece la comprensión y administración de los recursos naturales que en ella existen (Rizo et al., 2011), lo que permite mantener los hábitats y dar seguimiento a los sistemas productivos para conocer el estado que guardan los recursos de base de la microcuenca (Sánchez-Vélez et al., 2016).

El objetivo de esta investigación es caracterizar socioeconómica y biofísicamente la microcuenca agua escondida a través de consultas bibliográficas y elaboración de mapas para identificar las condiciones que existen en la microcuenca.

## **4.4 Materiales y métodos**

### **4.4.1 Área de estudio**

La microcuenca hidrográfica Agua Escondida (Santa Cruz Agua Escondida) se localiza al suroeste del estado de Puebla, abarca parte de los municipios de Izúcar de Matamoros, Epatlán, Ahuatlán y una pequeña parte de Xochitepec (Figura 1). Cuenta con una superficie de 6492 ha. Pertenece a la región hidrográfica del Balsas, cuenca hidrográfica del Río Atoyac -A y a la subcuenca Huaquechula. El área de estudio se localiza en la provincia del Eje Neovolcánico, las subprovincias de las sierras sur de Puebla y lagos y volcanes de Anáhuac. A una altitud entre 1000 y 1600 msnm. Con un rango de temperatura de 19 – 25 °C y rango de precipitación entre 700 – 900 mm. Presenta climas cálido subhúmedo con lluvias en verano y semicálido subhúmedo con lluvias en verano. El principal uso de suelo es la agricultura y el tipo de vegetación predominante es de selva baja caducifolia (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009).



**Figura 1.** Mapa de ubicación de la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

#### 4.4.2 Caracterización socioeconómica

Se realizó la descripción de los aspectos sociales, económicos y productivos del municipio de Izúcar de Matamoros, por ser el municipio que mayor área de la microcuenca abarca. Lo anterior a través consultas bibliográficas.

#### 4.4.3 Caracterización biofísica: unidades de paisaje

La caracterización de unidades de paisaje se realizó mediante la elaboración de mapas de fisiografía, clima y uso de suelo y vegetación mediante el apoyo de la herramienta de información geográfica ArcMap 10.8. Generados los tres mapas, se procedió a unirlos para formar el mapa de unidades de paisaje, enseguida, a cada área de paisaje generada se le asignó una clave y un nombre en orden de uso de suelo y vegetación, tipo de clima y por último la topoforma del terreno.

## **Mapa fisiográfico**

La elaboración del mapa fisiográfico inició con la descarga del modelo de elevación digital (DEM) de la página de INEGI, y se corrigió posibles errores. El DEM se usó como base para la generación de curvas de contorno cada 50 m, el Triangulated Irregular Network (TIN) el cual proporcionó la información de las alturas de la microcuenca, y las pendientes. En seguida, se realizó la clasificación de las áreas en base a la revisión bibliográfica realizada con anterioridad.

## **Mapa climático**

Para la elaboración del mapa climático se realizó la extracción de datos de temperatura máxima, mínima y de precipitación del área que rodea el área de estudio mediante el programa Extractor Rápido de Información Climatológica versión III, enseguida se realizó la depuración de las estaciones conservando aquellas que presentaban 27, 28, 29, 30 y más de 30 años.

### **Mapa de temperatura**

La elaboración del mapa de temperatura comenzó con la obtención de la temperatura media mensual y media anual de cada una de las estaciones con base a las temperaturas mínima y máxima obtenidas anteriormente, con el objetivo de elaborar gráficas y ecuaciones de regresión lineal simple. Con ello se generaron mediante el sistema de información geográfica ArcMap, el mapa anual y los mapas mensuales de isotermas. Se formaron rangos de temperatura los cuales fueron asignados a cada polígono generado en el área de estudio.

### **Mapa de precipitación**

Para la generación del mapa de precipitación se realizó la depuración de las estaciones tomando en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente y se obtuvo la precipitación anual para cada una de ellas. Además, se descargó el modelo de elevación digital (DEM). Una vez depuradas las estaciones, se

elaboraron tablas para determinar los rangos de precipitación, los cuales se usaron para identificar la isoyeta menor y mayor. Posteriormente se procedió a delimitar las isoyetas a través de la herramienta de información geográfica ArcMap 10.8. y se indicó el rango de temperatura de cada polígono generado.

### **Delimitación de áreas de influencia climática**

Para obtener las áreas de influencia climática, en ArcMap 10.8 se realizó una intersección de los mapas de temperatura y precipitación y se identificaron los polígonos que comparten el mismo rango de temperatura y la misma precipitación. Al mismo tiempo se definió el tipo de clima mediante el Sistema de Clasificación Climática de Köppen modificado por Enriqueta García.

### **Mapa de uso de suelo y vegetación**

El mapa de uso de suelo y vegetación se inició con la descarga de la serie VI de INEGI. En ArcMap 10.8 se procedió a cortar la capa obtenida con la del área de estudio. Posteriormente se revisaron los límites y se obtuvo la descripción del tipo de uso de suelo generado.

## **4.5 Resultados y discusión**

### **4.5.1 Caracterización socioeconómica**

El municipio de Izúcar de Matamoros se localiza al suroeste del estado de Puebla, y pertenece a la región Valle de Atlixco y Matamoros de la entidad a la que pertenece. Lo rodean Tilapa al noroeste, Tepeojuma al norte, Epatlán al noreste, Ahuatlán al este, Tehuitzingo al sureste, Chiautla al suroeste y Chietla al oeste.

Su extensión territorial es de 535 km<sup>2</sup> y aunque sólo 27 km<sup>2</sup> (5 %) corresponden a superficie urbana, la mayor parte de su población (85 %) reside en áreas urbanas. Lo anterior se refleja en las densidades que se registran, ya que mientras la densidad de población del municipio es de 146 hab/km<sup>2</sup>, la densidad urbana se eleva a 2467 hab/km<sup>2</sup>. Demográficamente, su población es de casi

78000 habitantes, equivalente a 1.25 % de la población del estado (Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos [ONU-HÁBITAT], 2018).

### **Aspecto social**

El Municipio se compone por una cabecera municipal y 65 localidades. En 2015 había un total de casi 20000 viviendas. El porcentaje de viviendas con luz eléctrica es de 99 %, con drenaje el 97 %, con agua entubada 94 % y con los que disponen de calentador solar de agua el 2 %, y solo el 0.2 % de viviendas disponen de panel solar para tener luz eléctrica. Cuenta con 6 escuelas de nivel inicial, 61 de nivel preescolar, 64 de nivel primaria, 36 de nivel secundaria, 30 de bachillerato general, 5 de formación para el trabajo, 10 de nivel superior, 1 CAM (centro de atención múltiple) y 9 supervisiones de zona escolar. En la cabecera municipal existen 104 escuelas de educación básica.

Los informes anuales sobre la situación de pobreza y rezago 2017 y 2018 (SEDESOL), dan a conocer que en el municipio hay un rezago educativo del 24 %. Existe déficit de infraestructura cultural (escenarios, teatros, salas de cine, salones de exposición etc).

Existen 4 sistemas principales que brindan atención médica a la población (SEGURO POPULAR, IMSS, ISSTEP e ISSSTE). Los jóvenes representan el 26 % de la población total del municipio entre los 15 y los 29 años de edad, es decir, la cuarta parte de la población es joven con necesidades propias de su sector. La población de hombres jóvenes representa el 45 % y la población de mujeres jóvenes el 55 % (H. Ayuntamiento del municipio de Izúcar de Matamoros, s.f.).

### **Aspecto económico**

La fuerza laboral representa el 47 % de la población, y aunque es más alta que la estatal (38 %), está por debajo de la tasa nacional (50 %). La tasa de desempleo (5 %) es mayor a la tasa estatal (3 %) y nacional (4 %). El 65 % de su población económicamente activa (PEA) labora en actividades relacionadas

con el comercio y los servicios, 18 % en actividades primarias y 16 % restante realiza actividades secundarias. De la PEA ocupada, más de 61.4 % recibe un ingreso menor a 2 salarios mínimos diarios. Los jóvenes representan el 33 % de la población ocupada total, sin embargo, el nivel de desocupación de jóvenes es del 54 %, mayor que el nivel de desocupación de adultos (ONU-HÁBITAT, 2018).

La mayor concentración de población ocupada se encuentra en la cabecera municipal (aproximadamente 17000 personas), el cual es un centro de atracción para muchos jóvenes en busca de empleo, sin embargo, la situación se torna difícil para los jóvenes de sectores vulnerables que tienen bajos niveles de empleabilidad, es decir no son atractivos para el mercado laboral (H. Ayuntamiento del municipio de Izúcar de Matamoros, s.f.).

### **Aspecto productivo**

El municipio cuenta con una moderada actividad agropecuaria. Contribuye con el 4 % de la producción agrícola del estado de Puebla y el 1 % de la producción de carne en canal. Los servicios que generan más empleos son los financieros e inmobiliarios (ONU-HÁBITAT, 2018).

Entre las principales actividades económicas destacan en primer lugar la agricultura, especialmente caracterizada por una marcada vocación cañera que le ha otorgado reconocimiento y participación económica en el estado de Puebla. Destaca también los cultivos de maíz, sorgo, cacahuete y arroz para el autoconsumo y la comercialización hacia estados colindantes. Con un menor impacto en la economía de la región sobresale la producción de carne bovina, porcina y aves. Del sector secundario, se encuentra la industria textil y de elaboración de alimentos, además de la producción de cerámica, mica y vidrio. También sobresale las actividades turísticas y de recreación. La actividad más representativa es la elaboración de azúcar y de ron, específicamente en el ingenio de Atencingo. Sin embargo, debido a los cambios en el contexto histórico, político y económico, la región de Izúcar de Matamoros muestra un

**Cuadro 1.** Topoformas delimitadas en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

| Descripción de<br>topoformas                                                                                                                                                                                                            | Superficie<br>(ha) | Superficie<br>(%) | Rango de<br>pendiente (%) | Altitud<br>(msnm) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| panorama de crisis en su vocación agraria. Y queda para la consideración que una región tan importante económicamente y con una alta participación del sector primario carezca de apoyos económicos y fomento al campo (Morales, 2016). |                    |                   |                           |                   |

**4.5.2 Caracterización biofísica: unidades de paisaje**

**Mapa fisiográfico**

En el municipio de Izúcar de Matamoros predomina el sistema de topoformas de sierra volcánica de laderas escarpadas y valle de laderas tendidas (INEGI, 2009), lo que concuerda con lo obtenido para la microcuenca agua escondida, ubicada al suroeste del estado de Puebla presentando un rango altitudinal entre los 1300 y 1470 msnm. En el Cuadro 1 se presentan las siete topoformas distintas que se obtuvieron, de las cuales la que ocupa la mayor superficie del área de estudio es la sierra moderadamente escarpada representada en un 42.56 %, seguida del valle moderadamente inclinado con un 22.95 % y en último lugar se ubica la sierra moderadamente inclinada con menos del 1 % de la superficie total, ilustrado en la Figura 2. Asimismo, se identificaron los diferentes tipos y texturas de suelo predominante, entre los que se encuentran litosol, regosol éutrico y Rendzina de textura media y vertisol pélico de textura fina. Además, en la microcuenca agua escondida se delimitaron cuatro rangos de pendiente, el rango de pendiente de 15 – 40 % es el que mayor superficie de la microcuenca ocupa con un 56.73 %, seguido del rango de 2 - 8 % ocupando un 23.21 % y en menor proporción el rango de 8 - 15 % con superficie de 9.38 % (Cuadro 2).

|                                |      |       |         |      |
|--------------------------------|------|-------|---------|------|
| Sierra escarpada               | 713  | 10.26 | > 40    | 1470 |
| Sierra moderadamente escarpada | 2956 | 42.56 | 15 - 40 | 1450 |



**Figura 2.** Mapa de fisiografía en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

**Cuadro 2.** Superficie por rango de pendientes en la Microcuenca Agua

| Rangos de pendiente (%) | Descripción             | Superficie (ha) | Superficie (%) |
|-------------------------|-------------------------|-----------------|----------------|
| 2 – 8                   | Moderadamente inclinado | 1612            | 23.21          |
| 8 – 15                  | Inclinado               | 651             | 9.38           |
| 15 – 40                 | Moderadamente escarpado | 3940            | 56.73          |
| > 40                    | Escarpado               | 741             | 10.68          |

Escondida, Puebla, México.

### Mapa climático

#### Mapa de temperatura

En el Cuadro 3 se presentan las ecuaciones de regresión lineal simple obtenidos para generar el mapa de temperatura media anual y mensuales ilustradas en la Figura 3 respectivamente.

**Cuadro 3.** Ecuaciones de regresión lineal simple generados para realizar el mapa de temperatura de la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

| Parámetros | Ecuación de regresión lineal simple |
|------------|-------------------------------------|
| Anual      | $T = 28.661 - 0.0049 h$             |
| Enero      | $T = 25.328 - 0.004 h$              |
| Febrero    | $T = 27.326 - 0.0044 h$             |
| Marzo      | $T = 33.06 - 0.0077 h$              |
| Abril      | $T = 35.972 - 0.0083 h$             |
| Mayo       | $T = 35.709 - 0.0079 h$             |
| Junio      | $T = 31.613 - 0.0056 h$             |
| Julio      | $T = 30.655 - 0.0057 h$             |
| Agosto     | $T = 30.452 - 0.0056 h$             |
| Septiembre | $T = 30.003 - 0.0056 h$             |
| Octubre    | $T = 29.15 - 0.0053 h$              |
| Noviembre  | $T = 27.463 - 0.0047 h$             |
| Diciembre  | $T = 25.511 - 0.0041 h$             |

T= Temperatura, h = altura



**Figura 3.** Mapa de temperatura media anual en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

La temperatura media anual para el municipio de Izúcar de Matamoros va de 16.1 a 21.8 ° C (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2015). El Cuadro 4 señala los datos de temperatura mensual y anual obtenidos para la microcuenca, del que se puede notar que el mes con temperaturas más bajas es enero con 19 °C y el que presenta temperaturas más altas es el mes de mayo con temperatura de 24 °C.

**Cuadro 4.** Temperatura media anual y mensual en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

| Rango<br>de T | T<br>media<br>anual | E  | F  | M  | A  | M  | J  | J  | A  | S  | O  | N  | D  |
|---------------|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 20 - 21       | 20.9                | 19 | 20 | 21 | 23 | 23 | 23 | 22 | 22 | 21 | 21 | 20 | 19 |
| 21 - 22       | 21.5                | 19 | 21 | 22 | 24 | 24 | 23 | 22 | 22 | 22 | 21 | 21 | 20 |

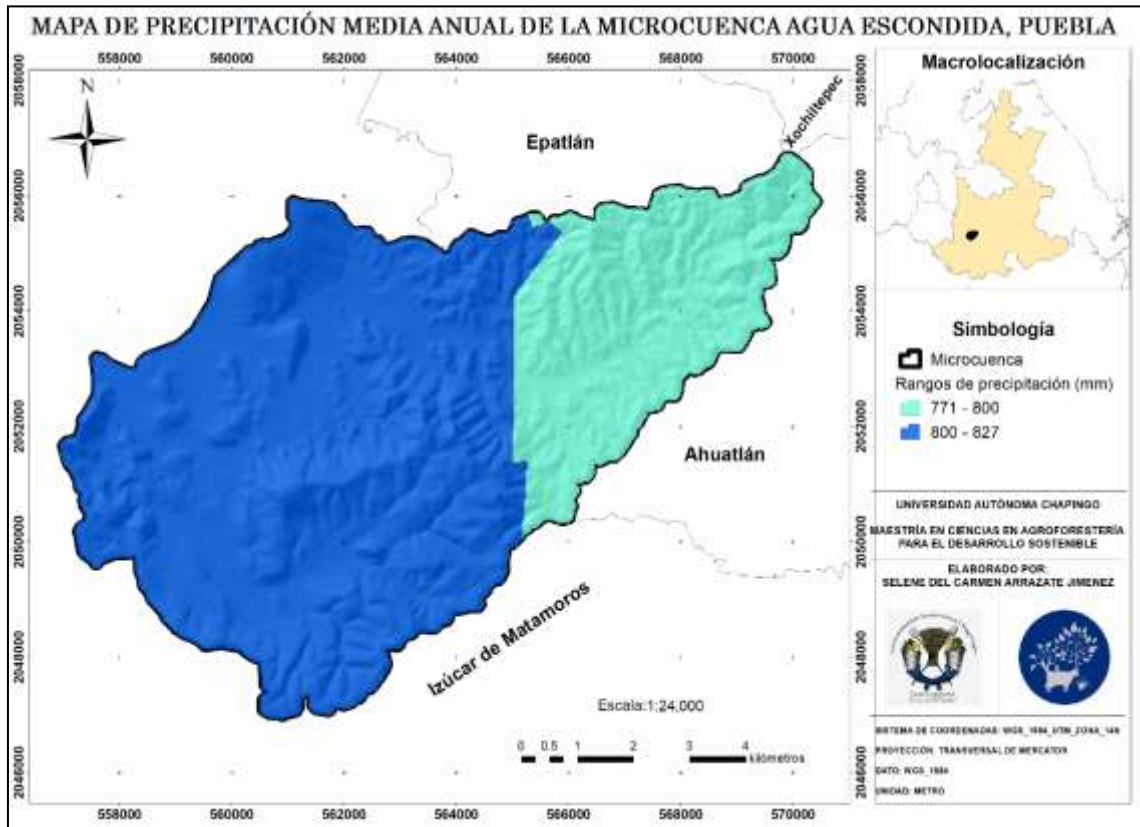
#### Mapa de precipitación

El Cuadro 5 expone los rangos anuales y los parámetros observados de precipitación media anual y mensual para la microcuenca Agua Escondida, además en la Figura 4 se muestra el mapa de precipitación generado. Mediante los datos expuestos es posible observar un marcado periodo de lluvias que comienza en mayo y termina en octubre presentando una mayor precipitación en el mes de junio, mientras que el periodo de secas se observa desde noviembre y finaliza en abril siendo el mes de diciembre el mes con menor precipitación. Los datos son similares a los reportados por la CONAGUA (2015) que indican una precipitación media anual de 890 mm, siendo junio, julio, agosto y septiembre los meses más lluviosos.

**Cuadro 5.** Valor observado de precipitación anual y mensual por rango de temperatura en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

| Rango<br>anual | Anual | E  | F | M | A  | M  | J   | J   | A   | S   | O  | N  | D |
|----------------|-------|----|---|---|----|----|-----|-----|-----|-----|----|----|---|
| 700-800        | 760   | 13 | 5 | 5 | 15 | 61 | 151 | 135 | 147 | 154 | 60 | 11 | 4 |
| 800-900        | 853   | 8  | 5 | 5 | 13 | 64 | 180 | 163 | 171 | 168 | 63 | 12 | 3 |

P= Parámetros



**Figura 4.** Mapa de precipitación media anual en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

### Áreas de influencia climática

Los climas predominantes en Izúcar de Matamoros, son los cálidos, principalmente el clima cálido con lluvias en verano y ligera oscilación de la temperatura (CONAGUA, 2015). Para la microcuenca, con lo obtenido sobre precipitación y temperatura, y con ayuda del sistema de clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García en la identificación de las áreas de influencia climática se encontró un tipo de clima para el área de estudio, el cual fue el perteneciente al grupo semicálido subhúmedo, denotado como A (C) w0 (w) (i) g, tal como se muestra en el Cuadro 6.

**Cuadro 6.** Clima identificado en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

| Clima              | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A (C) w0 (w) (i) g | Semicálido del grupo de los cálidos, el más seco de los subhúmedos, con régimen de lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor a 5, con oscilación anual de las temperaturas medias mensuales de tipo isotermal y marcha anual de la temperatura tipo Ganges. |

### Mapa de uso de suelo y vegetación

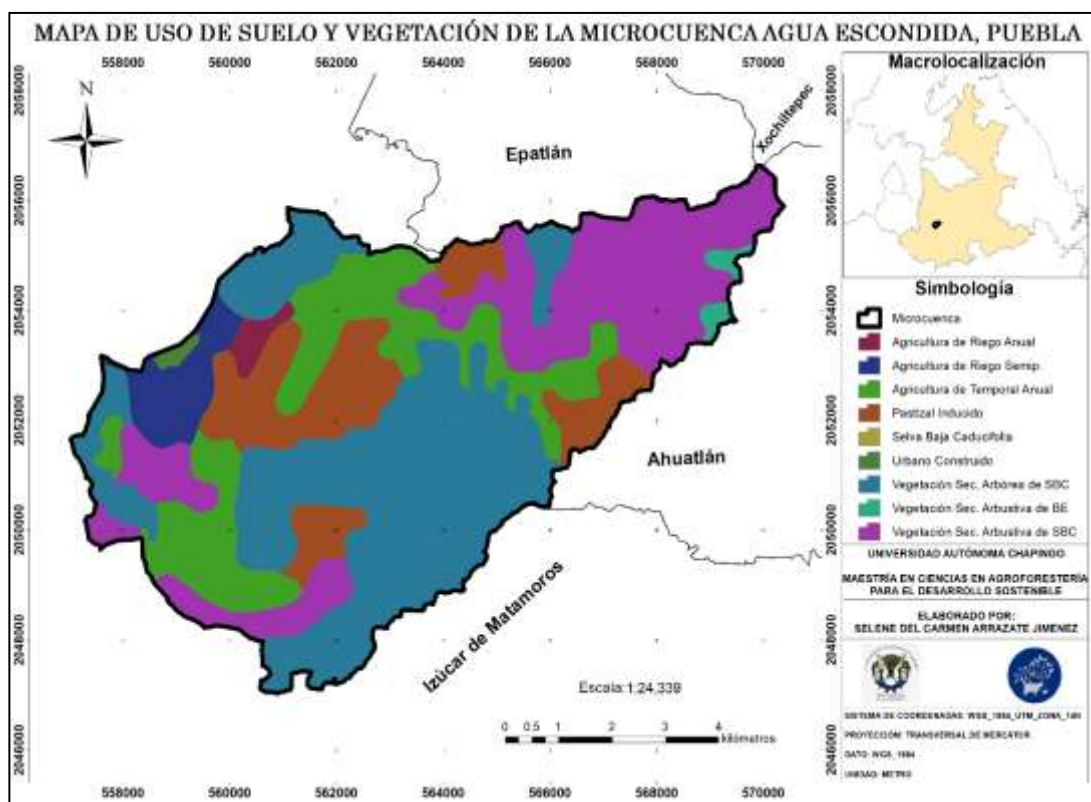
Se delimitaron nueve tipos de uso de suelo y vegetación en la Microcuenca Agua Escondida. En el Cuadro 7 es posible observar que predomina la vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia ocupando el 36.92 %, seguido de la vegetación secundara arbustiva de selva baja caducifolia con el 24.32 %. La agricultura ocupa el 23.16 % de la superficie total, siendo la agricultura de temporal anual la de mayor ocupación. Además, se encontró una porción de superficie ocupada por pastizal inducido ocupando el 14.29 %. En la Figura 5 se ilustra la distribución de los usos de suelo y vegetación encontrados en el área de estudio.

| Tipo de vegetación | Superficie<br>(ha) | Superficie<br>(%) |
|--------------------|--------------------|-------------------|
|--------------------|--------------------|-------------------|

|                                        |      |       |
|----------------------------------------|------|-------|
| Agricultura de riego anual             | 67   | 1.04  |
| Agricultura de riego semipermanente    | 280  | 4.30  |
| Agricultura de temporal anual          | 1160 | 17.82 |
| Pastizal inducido                      | 930  | 14.29 |
| Selva baja caducifolia                 | 0.60 | 0.01  |
| Urbano construido                      | 25   | 0.38  |
| Vegetación secundaria arbórea de SBC   | 2403 | 36.92 |
| Vegetación secundaria arbustiva de BE  | 60   | 0.92  |
| Vegetación secundaria arbustiva de SBC | 1583 | 24.32 |

**Cuadro 7.** Uso de suelo y vegetación encontrados en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

SBC=Selva Baja Caducifolia; BE=Bosque de Encino



**Figura 5.** Mapa de uso de suelo y vegetación en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

**Mapa de unidades de paisaje**

Gracias a los mapas de uso de suelo y vegetación, unidades climáticas y topoformas, se encontraron 28 unidades de paisaje, los cuales se describen en el Cuadro 8, predominando la vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra moderadamente escarpada ocupando el 17.08 % de la superficie, seguida de la vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra moderadamente escarpada con el 13.54 %, mientras que la vegetación menos representativa es la agricultura de riego anual en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente escarpado con menos de una hectárea de superficie. En cuanto al área ocupada de agricultura está representada en un 23.15 % y el pastizal inducido solo representa un 14.27 % de la superficie total.

En el municipio de Izúcar de Matamoros predomina el sistema de topoformas de sierra y los tipos de vegetación de selva y agricultura (INEGI, 2009). Izúcar de Matamoros el municipio que mayor área abarca de la microcuenca, por lo que era de esperarse la predominancia del mismo sistema de topoformas y tipo de vegetación para la microcuenca. En la Figura 6 se ilustra la distribución de las 28 unidades de paisaje delimitadas para el área de estudio.

**Cuadro 8.** Unidades de paisaje en la Microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

| Clave de identificación | Descripción                                                                                       | Superficie (ha) | Superficie (%) |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|
| ARA_A(C)_V<br>ME        | Agricultura de riego anual en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente escarpado          | 0.002           | 0.0004         |
| ARA_A(C)_V<br>MI        | Agricultura de riego anual en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente inclinado          | 67.487          | 1.04           |
| ARS_A(C)_V<br>MI        | Agricultura de riego semipermanente en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente inclinado | 280.035         | 4.3            |
| ATA_A(C)_S<br>ME        | Agricultura de temporal anual en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra moderadamente escarpada     | 295.190         | 4.54           |
| ATA_A(C)_VI             | Agricultura de temporal anual en un                                                               | 281.048         | 4.32           |

|                    |                                                                                                                         |         |       |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|
|                    | clima A(C)w0(w)(i)g en un valle inclinado                                                                               |         |       |
| ATA_A(C)_VME       | Agricultura de temporal anual en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente escarpado                             | 13.175  | 0.20  |
| ATA_A(C)_VMI       | Agricultura de temporal anual en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente inclinado                             | 569.557 | 8.75  |
| PI_A(C)_SE         | Pastizal inducido en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra escarpada                                                     | 11.120  | 0.17  |
| PI_A(C)_SME        | Pastizal inducido en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra moderadamente escarpada                                       | 436.257 | 6.70  |
| PI_A(C)_SMI        | Pastizal inducido en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra moderadamente inclinada                                       | 15.774  | 0.24  |
| PI_A(C)_VI         | Pastizal inducido en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle inclinado                                                       | 50.693  | 0.78  |
| PI_A(C)_VME        | Pastizal inducido en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente escarpado                                         | 102.305 | 1.57  |
| PI_A(C)_VMI        | Pastizal inducido en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente inclinado                                         | 313.152 | 4.81  |
| SBC_A(C)_VME       | Selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente escarpado                                    | 0.578   | 0.01  |
| UC_A(C)_VMI        | Urbano construido en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente inclinado                                         | 25.063  | 0.39  |
| VSARBOSBC_A(C)_SE  | Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra escarpada               | 665.430 | 10.23 |
| VSARBOSBC_A(C)_SME | Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra moderadamente escarpada | 881.246 | 13.54 |
| VSARBOSBC_A(C)_SMI | Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra moderadamente inclinada | 2.310   | 0.035 |
| VSARBOSBC_A(C)_VE  | Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle                           | 14.908  | 0.23  |

|                        |                                                                                                                           |          |       |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|
|                        | escarpado                                                                                                                 |          |       |
| VSARBOSBC<br>_A(C)_VI  | Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle inclinado                   | 134.629  | 2.07  |
| VSARBOSBC<br>_A(C)_VME | Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente escarpado     | 562.086  | 8.64  |
| VSARBOSBC<br>_A(C)_VMI | Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente inclinado     | 143.054  | 2.20  |
| VSARBUBE_<br>A(C)_SME  | Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra moderadamente escarpada       | 60.094   | 0.92  |
| VSARBUSBC<br>_A(C)_SME | Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en una sierra moderadamente escarpada | 1111.535 | 17.08 |
| VSARBUSBC<br>_A(C)_VE  | Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle escarpado                 | 0.051    | 0.008 |
| VSARBUSBC<br>_A(C)_VI  | Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle inclinado                 | 121.822  | 1.87  |
| VSARBUSBC<br>_A(C)_VME | Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente escarpado   | 193.722  | 2.98  |
| VSARBUSBC<br>_A(C)_VMI | Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i)g en un valle moderadamente inclinado   | 154.533  | 2.37  |

---



En la microcuenca Agua Escondida predomina el sistema de topoforma denominada sierra y los principales tipos de suelo son litosol y regosol éutrico. Se presenta el tipo de clima semicálido, caracterizado por ser el más seco de los subhúmedos, con régimen de lluvias en verano. Se observa un marcado periodo de lluvias que comienza en mayo y termina en octubre, mientras que el periodo de secas se presenta desde noviembre hasta abril. El principal uso de suelo y vegetación es la vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia ocupando el 37 % del área de estudio. Se obtuvieron 28 unidades de paisaje, predominando la vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia en un clima A(C)w0(w)(i) g en una sierra moderadamente escarpada ocupando el 17 % de la superficie.

#### 4.7 Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de la presente investigación.

#### 4.8 Literatura citada

- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros (2103), estado de Puebla*.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103301/DR\\_2103.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103301/DR_2103.pdf)
- Cotler, Á. H. (ed.). (2010). *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización*. México: Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V.
- H. Ayuntamiento del municipio de Izúcar de Matamoros, (s.f.). *Plan de Desarrollo Municipal 2018-2021*. [Archivo PDF].  
<https://www.izucar.gob.mx/wp-content/uploads/2019/03/PDM-2018-2021-VF.1.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Izúcar de Matamoros, Puebla.  
[https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/21/21114.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21114.pdf)
- Morales, R. E. (2016). *Migración y desarrollo una relación compleja: Atlixco y Matamoros, análisis regional* (Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla). Repositorio Institucional BUAP. Consultada en  
<https://hdl.handle.net/20.500.12371/2555>

- Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-HÁBITAT). (2018). *Índice básico de las ciudades próspera*. Izúcar de Matamoros, Puebla. México.  
[https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/2018/21085\\_Iz%C3%BAcar\\_de\\_Matamoros.pdf](https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/2018/21085_Iz%C3%BAcar_de_Matamoros.pdf)
- Rizo, M. R., Romero G, L. J. y Zeledón Ch, J. J. (2011). *Caracterización biofísica y socioeconómica de la microcuenca La Jabonera, perteneciente a la subcuenca del Río Estelí*. (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua). Repositorio Institucional UNAN-Managua. Consultada en <https://repositorio.unan.edu.ni/1853/>
- Sánchez, V. A. S., García, N. R. M. y Palma, T. A. (eds). (2003). *La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de los recursos naturales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Sánchez-Vélez, A., Navarro-Sandoval, L. y García-Núñez, R. M. (2016). Estudio comparativo de los recursos hidrológico-forestales de la Microcuenca de la Laguna de Epatlán, Pue. (1993-2014). *Ciencias de la Biología y Agronomía*, 1-10.

## **5 COMPOSICIÓN Y DIVERSIDAD DE ESPECIES EN POBLACIÓN NATURAL SUJETA A EXTRACCIÓN DE COPAL EN LA MIXTECA POBLANA**

### **COMPOSITION AND SPECIES DIVERSITY IN NATURAL POPULATION SUBJECT TO COPAL EXTRACTION IN THE MIXTECA POBLANA**

**Selene del Carmen Arrazate-Jimenez<sup>1</sup>; Rosa María García Núñez<sup>1</sup>; Julio  
César Buendía Espinoza<sup>1</sup>; Alejandro Sánchez Vélez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, CP 56230 Texcoco, México. Email: [arrazate.jimenez13@gmail.com](mailto:arrazate.jimenez13@gmail.com); [blondynunez@gmail.com](mailto:blondynunez@gmail.com); [jcbuendiae@hotmail.com](mailto:jcbuendiae@hotmail.com).*

<sup>2</sup>*Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, CP 56230 Texcoco, México. Email: [dr.zhivago2014@gmail.com](mailto:dr.zhivago2014@gmail.com).*

#### **5.1 Resumen**

La composición y diversidad florística de ecosistemas sujetos a una sobreexplotación, como es el bosque tropical caducifolio donde se extrae resina de copal (*Bursera bipinnata*, *B. copallifera*), es de suma importancia para poder entender el funcionamiento ecológico de estos ecosistemas. En esta investigación se analizó la composición y diversidad de especies en una población natural sujeta a extracción de copal en San Juan Raboso Izúcar de Matamoros, Puebla, México. Se establecieron 54 unidades muestrales y se registraron para cada especie arbórea: número de individuos y diámetro de copa. Para las especies arbustivas, crasas, rosetofilas acaulescentes y trepadoras se cuantificó el número de individuos y el área de cobertura. Se obtuvo el índice de valor de importancia (IVI) mediante los parámetros de abundancia, frecuencia y dominancia relativa. La diversidad se estimó mediante el índice de Shannon-Wiener (H'). Se obtuvo una riqueza específica de 29 especies, distribuidas en 11 familias botánicas y 21 géneros. La familia

Fabaceae resultó la de mayor riqueza, también sobresalió la familia Burseraceae, en la que se incluyen las especies de la que se extrae el copal. La especie de mayor peso ecológico fue *Opuntia streptacantha*. Se registró un valor promedio de índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ) de 1.45, lo que refleja que es un área en que algunas especies fueron más abundantes que otras, provocado por una alteración en la estructura del ecosistema.

**Palabras clave:** bosque tropical caducifolio, *Bursera bipinnata*, *Bursera copallifera*, índice de Shannon-Wiener, índice de valor de importancia, riqueza de especies.

## 5.2 Abstract

The composition and floristic diversity of ecosystems subject to overexploitation, such as tropical deciduous forests where copal resin (*Bursera bipinnata*, *B. copallifera*) is extracted, is of utmost importance to understand the ecological functioning of these ecosystems. In this research we analyzed the composition and diversity of species in a natural population subject to copal extraction in San Juan Raboso Izúcar de Matamoros, Puebla, Mexico. Fifty-four sampling units were established and the number of individuals and crown diameter were recorded for each tree species. For shrub species, succulents, acaulescent rosetophytes and climbers, the number of individuals and the area of cover were quantified. The importance value index (IVI) was obtained using the parameters of abundance, frequency and relative dominance. Diversity was estimated using the Shannon-Wiener index ( $H'$ ). A specific richness of 29 species was obtained, distributed in 11 botanical families and 21 genera. The Fabaceae family was the richest; the Burseraceae family, which includes the species from which copal is extracted, also stood out. The species with the greatest ecological weight was *Opuntia streptacantha*. An average Shannon-Wiener index value ( $H'$ ) of 1.45 was recorded, which reflects that it is an area in which some species were more abundant than others, caused by an alteration in the structure of the ecosystem.

**Keywords:** tropical deciduous forest, *Bursera bipinnata*, *Bursera copallifera*, Shannon-Wiener index, importance value index, species richness.

## 5.3 Introducción

El bosque tropical caducifolio alberga una gran cantidad de especies vegetales del mundo, influye en el clima, regula el caudal de los ríos, y provee de productos forestales maderables y no maderables como taninos, frutos, fibras, palmas, resinas, etc. (Cayuela, 2006; Couttolenc-Brenis et al., 2005). Es un

ecosistema fuertemente amenazados por actividades antropogénicas (Meave et al., 2012). Su superficie ha sido reducida radicalmente debido al crecimiento de la frontera agrícola, al acelerado crecimiento poblacional y a la búsqueda de mejores condiciones de vida (González et al., 2007), afectando el cambio de cobertura del suelo y la biodiversidad. Su sobreexplotación ha ocasionado la destrucción del ecosistema y puesto en riesgo el equilibrio ecológico (Badii et al., 2015).

Este tipo de vegetación encuentra una de sus máximas expresiones en la depresión del Balsas (Rzedowski y Calderón de Rzedowski, 2013), ya que posee una gran riqueza florística (Rzedowski, 2006) debido a su gran diversidad de condiciones ambientales y relaciones con las provincias florísticas circundantes. Su diversidad y endemismo la hace una de las regiones del país con mayor interés botánico, sin embargo, autores como Méndez-Toribio et al. (2014) y Pineda-García et al. (2007) consideran que es poco conocida y estudiada. Tal es el caso de los remanentes del bosque tropical caducifolio de la cuenca del alto Balsas poblano, donde se localiza una amplia diversidad de árboles y arbustos de uso múltiple (Guízar-Nolazco et al., 2010), de donde se obtienen principalmente productos forestales no maderables como, frutos, resinas aromáticas, aceites esenciales, taninos y artesanías, así como se extrae leña y madera para la elaboración de muebles rústicos (Rzedowski, 2006). Esta riqueza de especies de uso múltiple es utilizada como alternativa económica sustentable para los habitantes de regiones del cálido seco (García et al., 2014), tal es el caso, de las especies de la familia Burseraceae, destacando el género *Bursera*, en las áreas aledañas a Izúcar de Matamoros, Puebla, México (Rzedowski y Calderón de Rzedowski, 2013). De algunas de sus especies, se extrae la resina aromática llamada copal, la cual representa una fuente de ingresos económicos; además de mostrar un apego cultural y religioso (Linares y Bye, 2008). Sin embargo, su sobreexplotación puede ocasionar debilitamiento o muerte del arbolado y con ello probable pérdida de especies, o de diversidad

genética (Moreno-Casasola y Paradowska, 2009), ya que no existe planeación, ni evaluación del impacto ecológico de sus poblaciones.

Determinar la composición y la diversidad florística de ecosistemas sujetos a sobreexplotación es de gran importancia para poder entender su funcionamiento ecológico, para aportar elementos de decisión que contribuyan al manejo adecuado de las especies aprovechadas, al desarrollo de planes de conservación y al uso sustentable de los recursos naturales (Villarreal et al., 2006). El bosque tropical caducifolio de San Juan Raboso Izúcar de Matamoros es un caso de ecosistema sobreexplotado al ser afectado por el aumento de copaleros, que ante la demanda de resina de copal promueven un proceso de extracción inadecuado y daños severos al arbolado, lo que provoca la disminución de sus poblaciones (Linares y Bye, 2008). Por lo tanto, el conocimiento, la cuantificación y el análisis de este tipo de bosque son de relevancia para comprender el mundo natural y los cambios inducidos ante actividades humanas (Martínez-Cruz et al., 2013; Villarreal et al., 2006).

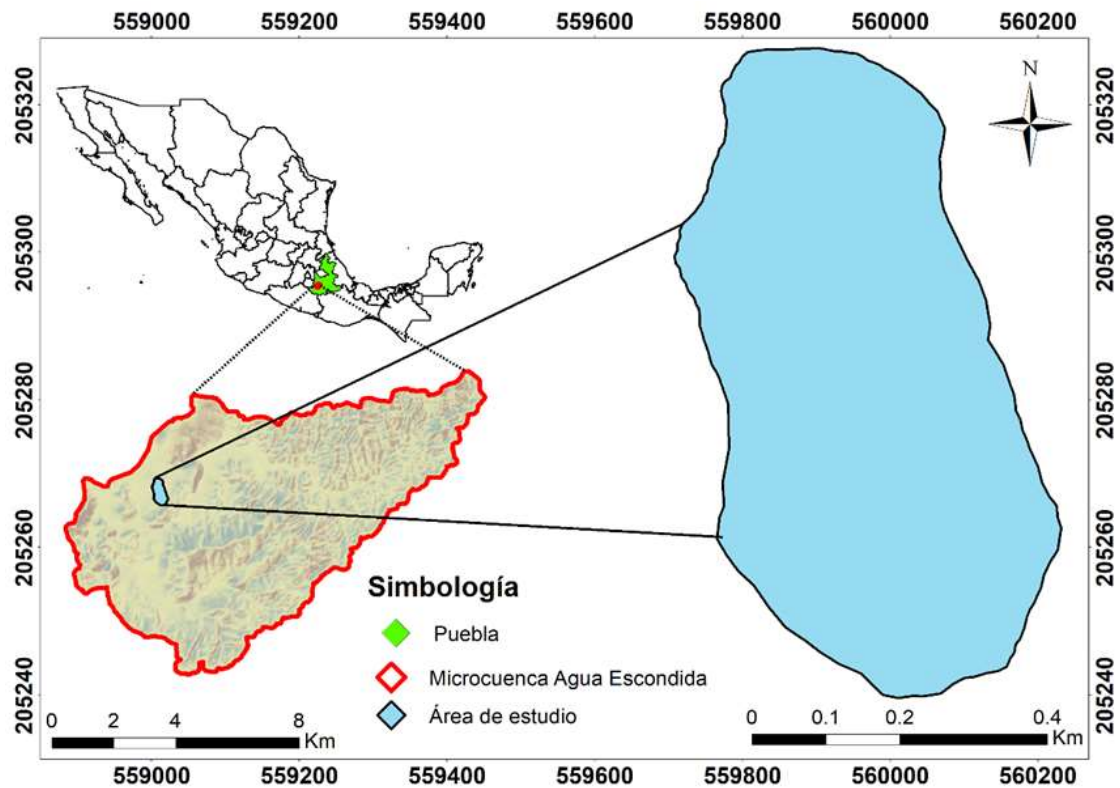
El objetivo de este trabajo es evaluar la composición y diversidad de especies en una población natural sujeta a extracción de copal a través del índice de valor de importancia y de diversidad para conocer el papel que juegan las especies productoras de copal dentro de la comunidad vegetal.

## **5.4 Materiales y métodos**

### **5.4.1 Área de estudio**

El área de estudio fue el ejido de San Juan Raboso, municipio de Izúcar de Matamoros, ubicado al suroeste del estado de Puebla, México, en la zona denominada “cerro de la virgen”, dentro de la microcuenca hidrográfica Agua Escondida (Fig. 7), con una elevación de 1282 m y un área de 30.8 ha. El clima principal es cálido subhúmedo con lluvias en verano y temperatura media anual de 22 °C a 24 °C. La precipitación total anual varía de 800 a 1000 mm. Los

suelos predominantes son: leptosol y vertisol (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2017). La vegetación es bosque tropical caducifolio, característico de regiones que presentan dos estaciones bien definidas de disponibilidad de humedad: la lluviosa y la seca (Rzedowski, 2006), así como la presencia de especies que tiran sus hojas en la época seca del año y presentan cortezas escamosas papiráceas o con protuberancias espinosas o corchosas, con copas poco densas y muy abiertas (Pennington y Sarukhán, 2005).



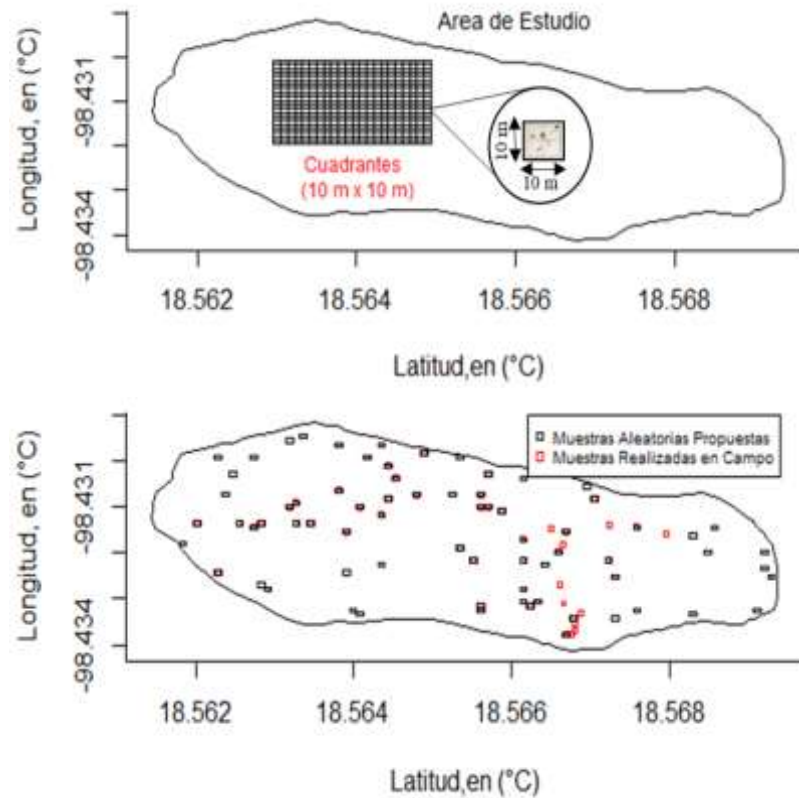
**Figura 7.** Localización del área de estudio, en la microcuenca Agua Escondida, Puebla, México.

#### 5.4.2 Muestreo de la vegetación

Para el levantamiento de los datos ecológicos de la vegetación en el área de estudio se realizó un muestreo aleatorio. Se obtuvieron las coordenadas geográficas de cada unidad de muestreo y se ubicaron en el área de estudio. La

unidad de muestreo fue un cuadrante de 10 m<sup>2</sup> (Paredes et al., 2019). Por lo que, 3 097 unidades de muestreo (UM) se estimaron en las 30.8 ha del área de estudio. El tamaño de muestra calculado para estimar la media poblacional con el 95 % de confianza y un error porcentual de estimación menor o igual del 15 % fue de 72 unidades de muestreo en el área de estudio; sin embargo, debido a la falta de recursos económicos solo se obtuvo información de 54. Los cuadros color negro son las 72 UM propuestas, y los cuadros color rojo son las 54 UM que se levantaron en campo. Algunas UM propuestas presentaron problemas con el acceso por lo que la UM se estableció en el lugar más cercano al punto de referencia (Fig. 8).

En cada unidad de muestreo (UM) se registraron e identificaron taxonómicamente todas las especies encontradas con ayuda de personas nativas del ejido de San Juan Raboso, quienes brindaron información sobre algunos usos, así como el nombre común de los individuos observados. Las variables medidas para cada especie arbórea fueron: número de individuos y diámetro de copa. Para las especies arbustivas, crasas y rosetofilas acaulescentes se cuantificó el número de individuos y el área de cobertura (Gallardo-Cruz et al., 2005).



**Figura 8.** Ubicación de las unidades de muestreo en el área de estudio.

#### 5.4.3 Índice estructural IVI

El Índice de valor de importancia (IVI) permite conocer la importancia ecológica de una especie dentro de la comunidad vegetal, y se calcula a partir de la suma de los parámetros estructurales de abundancia, frecuencia y dominancia relativa (Lozada, 2010; Moreno, 2001).

$$IVI = AR_i + DR_i + FR_i \quad (1)$$

donde  $AR_i$  es la abundancia relativa,  $DR_i$  la dominancia relativa y  $FR_i$  la frecuencia relativa.

Los valores de abundancia, frecuencia y dominancia se determinaron de acuerdo con Mora-Donjuan et al. (2014):

**Abundancia absoluta y relativa.** La abundancia absoluta y relativa de las especies en las diferentes unidades de muestreo se calculó como sigue:

$$A_i = \left( \frac{N_i}{S} \right) \quad (2)$$

$$AR_i = \left( \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \right) * 100 \quad (3)$$

donde  $A_i$  es la abundancia absoluta,  $AR_i$  es la abundancia relativa de la especie  $i$  respecto a la abundancia total,  $N_i$  es el número de individuos de la especie  $i$  y  $S$  la superficie de muestreo (ha).

**Frecuencia absoluta y relativa.** La frecuencia absoluta y relativa se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$F_i = \left( \frac{P_i}{NS} \right) \quad (4)$$

$$FR_i = \left( \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \right) * 100 \quad (5)$$

donde  $F_i$  es la frecuencia absoluta,  $FR_i$  es la frecuencia relativa de la especie  $i$  respecto a la frecuencia total,  $P_i$  es el número de sitios en la que está presente la especie  $i$  y  $NS$  el número total de sitios de muestreo.

**Dominancia absoluta y relativa.** La dominancia absoluta y relativa de las especies en las diferentes unidades de muestreo se estimaron de la siguiente manera:

$$D_i = \left( \frac{Ab_i}{S(ha)} \right) \quad (6)$$

$$DR_i = \left( \frac{D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \right) * 100 \quad (7)$$

donde  $D_i$  es la dominancia absoluta,  $DR_i$  es la dominancia relativa de la especie  $i$  respecto a la dominancia total,  $Ab$  el área de copa de la especie  $i$  y  $S$  la superficie (ha).

#### 5.4.4 Medida de la diversidad de especies

La diversidad de especies refleja la estructura y caracteriza a una comunidad respecto de otra.

**Índice de Shannon.** Es una medida de la diversidad a través del número de especies y su abundancia (Soler et al., 2012). Conceptualmente es una medida del grado de incertidumbre asociada a la selección aleatoria de un individuo en la comunidad y es ampliamente usado como indicador de los cambios en la diversidad en función de los cambios de factores ambientales, por lo que se considera una medida aceptable de confiabilidad del valor estimado (Alanís-Rodríguez et al., 2011; Pla, 2006).

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i * \ln(P_i) \quad (9)$$

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (10)$$

Donde  $S$  es el número de especies presentes,  $N$  es el número total de individuos y  $n_i$  es el número de individuos de la especie  $i$ . El valor de  $H'$  se encuentra acotado entre 0 y  $\ln S$ , tiende a cero en comunidades poco diversas y es igual al logaritmo de la riqueza específica en comunidades de máxima equitatividad. La riqueza específica se midió como el número de especies presentes en la comunidad (Magurran, 1988). Los valores de Shannon entre 0 y

1.35 son indicativos de una baja diversidad, de 1.36 a 3.5 indican una diversidad media y más de 3.5 indica una alta diversidad (Aguirre, 2013).

**Construcción de Intervalo de Confianza Bootstrap (ICB).** Se utilizó el método del Intervalo de confianza Bootstrap para construir el Intervalo de Confianza. El estimador bootstrap  $H^*$  tiene una distribución aproximadamente normal con una media  $H$  y una desviación estándar  $\sigma_H$ ; por tanto, hay  $(1 - \alpha)$  probabilidad de que:

$$\left( H + z_{\alpha/2} \sigma_H < H^* < H + z_{(1-\alpha/2)} \sigma_H \right)$$

para cualquier aleatoria muestra utilizada para calcular  $H^*$  (Efron, 1979).

El intervalo de confianza es entonces:

$$\left( \bar{H}^* + z_{\alpha/2} \sigma_H^* < H < \bar{H}^* + z_{(1-\alpha/2)} \sigma_H^* \right)$$

donde  $\bar{H}^*$  es la media estimada del parámetro bootstrap y  $\sigma_H^{*2}$  es su varianza.

$$\bar{H}^* = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^B H_j^* \quad y \quad \sigma_H^{*2} = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^B (H_j^* - \bar{H}^*)^2$$

siendo  $B$  el número de muestras bootstrap tomadas. La cobertura del intervalo bootstrap se realizó con 0.95 de probabilidad nominal y con 1000 repeticiones (Pla, 2004; Pla y Matteucci, 2001).

## 5.5 Resultados

### 5.5.1 Composición florística

Un total de 968 individuos se registraron en las 54 unidades de muestreo, pertenecientes a 29 especies, distribuidas en 11 familias botánicas y 21 géneros (Tabla 1). Se encontraron 13 especies arbóreas, *Lonchocarpus caudatus*, *Ipomoea wolcottiana*, *Piptadenia viridiflora*, *Bursera bipinnata*, *B.*

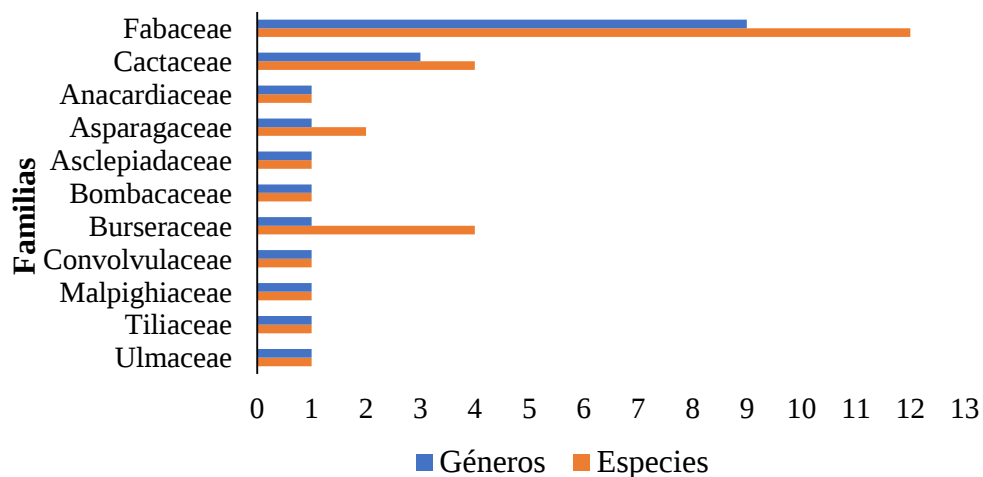
*copallifera*, *Acacia coulteri*, *Ceiba aesculifolia*, *Celtis cauadata*, *Lysiloma divaracata*, *Conzattia multiflora*, *B. aptera*, *B. aloexylon* y *Cyrtocarpa procera*. Las nueve especies arbustivas halladas fueron *Acacia cochiliacantha*, *A. farnesiana*, *A. pennatula*, *Mimosa benthami*, *Pithecellobium acatlense*, *Styphnolobium burseroides*, *Cassia emarginata*, *Bunchosia lanceolata* y *Heliocarpus terebinthinaceus*. Entre las cuatro especies de crasas se encontró *Opuntia streptacantha*, *Stenocereus stellatus*, *S. griseus* y *Echinocactus platyacanthus*, esta última enlistada en la NOM-059-Semarnat-2010 bajo la categoría de protección especial. Las dos especies rosetofilas acaulescentes encontradas fueron *Agave ghiesbreghtii* y *A. karwinskii*. La única especie trepadora identificada fue *Masdenia zimapanica*.

**Tabla 1.** Nombre común, científico y familia de las especies presentes en el área de estudio (ordenados por familias).

| Nombre común     | Nombre científico                                        | Familia        |
|------------------|----------------------------------------------------------|----------------|
| Coco de cerro    | <i>Cyrtocarpa procera</i> H.B.K.                         | Anacardiaceae  |
| Tecuampatli      | <i>Masdenia zimapanica</i> Hemsl                         | Asclepiadaceae |
| Magüey           | <i>Agave ghiesbreghtii</i> Lem ex Jacobi                 | Asparagaceae   |
| Magüey oscuro    | <i>Agave karwinskii</i> Zucc                             | Asparagaceae   |
| Pochote          | <i>Ceiba aesculifolia</i> (H.B.K.) Britt. & Baker        | Bombacaceae    |
| Linaloe          | <i>Bursera aloexylon</i> (Schiede) Engl.                 | Burseraceae    |
| Cuajote amarillo | <i>Bursera aptera</i> Ramírez                            | Burseraceae    |
| Copal chino      | <i>Bursera bipinnata</i> (Sessé & Moc.) Engl.            | Burseraceae    |
| Copal            | <i>Bursera copallifera</i> (Sessé & Moc. Ex DC.) Bullock | Burseraceae    |
| Biznaga          | <i>Echinocactus platyacanthus</i> Link & Otto            | Cactaceae      |
| Nopal            | <i>Opuntia streptacantha</i> Lem                         | Cactaceae      |
| Pitayo           | <i>Stenocereus griseus</i> (Haw.) Buxb.                  | Cactaceae      |
| Pitayo           | <i>Stenocereus stellatus</i> (Pfeiff.) Riccob.           | Cactaceae      |
| Cazahuate        | <i>Ipomoea wolcottiana</i> Rose                          | Convolvulaceae |
| Cubata negra     | <i>Acacia cochiliacantha</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.    | Fabaceae       |
| Palo blanco      | <i>Acacia coulteri</i> Benth.                            | Fabaceae       |
| Huizache         | <i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.                     | Fabaceae       |
| Cubata blanca    | <i>Acacia pennatula</i> (Schlecht. et Cham.) Benth.      | Fabaceae       |

|                  |                                                    |               |
|------------------|----------------------------------------------------|---------------|
| Palo totole      | <i>Conzattia multiflora</i> (Rob.) Standl.         | Fabaceae      |
| Tapachichi       | <i>Lonchocarpus caudatus</i> Pittier               | Fabaceae      |
| Tlahuitolo       | <i>Lysiloma divaracata</i> (Jacq.) McBride         | Fabaceae      |
| Tecolhuixtle     | <i>Mimosa benthami</i> Macbride                    | Fabaceae      |
| Huamuchilillo    | <i>Piptadenia viridiflora</i> (Kunth) Benth.       | Fabaceae      |
| Barba de chivo   | <i>Pithecellobium acatlense</i> Benth.             | Fabaceae      |
| Pico de pájaro   | <i>Styphnolobium burseroides</i>                   | Fabaceae      |
| Vara de san José | <i>Cassia emarginata</i> L                         | Fabaceae      |
| Nanche de zorro  | <i>Bunchosia lanceolata</i> Turez                  | Malpighiaceae |
| Calahuate        | <i>Heliolepis terebinthinaceus</i> (DC.)<br>Hochr. | Tiliaceae     |
| Palo sosenaco    | <i>Celtis caudata</i> Planch.                      | Ulmaceae      |

La familia con mayor riqueza en especies fue la Fabaceae, con 12 y las de menor riqueza de especies fueron las familias Anacardiaceae, Asclepiadaceae, Bombacaceae, Convolvulaceae, Malpighiaceae, Tiliaceae y Ulmaceae, con una sola especie. La familia Fabaceae también presentó el mayor número de géneros, con nueve. La familia Burseraceae, caracterizada por contener especies de las que se extraen resinas como la de copal, fue la segunda familia de mayor riqueza en especies, junto con la Cactaceae (representada por cuatro especies), entre las que sobresalen *B. bipinnata* y *B. copallifera* (Fig. 9).



**Figura 9.** Número de géneros y especies por familia presentes en el área de estudio.

### 5.5.2 Índice estructural IVI

**Abundancia relativa.** Los resultados de abundancia relativa en la zona de estudio señalan que la especie más representativa fue *Opuntia streptacantha* con una abundancia del 34 %, seguida de *Echinocactus platyacanthus* con 8.3 % y *Acacia pennatula* con 6.3 %. Las especies con menor abundancia relativa fueron: *Bursera aloexylon*, *B. aptera*, *Conzattia multiflora*, *Cyrtocarpa procera*, *Lysiloma divaricata*, *Agave karwinskii*, *Heliocarpus terebinthinaceus*, *Celtis caudata*, *Styphnolobium burseroides*, *B. copallifera*, *Cassia emarginata* y *Masdenia zimapanica*, con menos del 1 %. Las especies aprovechadas para la obtención de resina de copal como *Bursera bipinnata* y *B. copallifera* presentaron abundancia relativa baja, con 1.9 % y 0.8 % respectivamente, en comparación a *Opuntia streptacantha*, la especie con mayor abundancia en el área de estudio.

**Frecuencia relativa.** Los resultados de frecuencia relativa muestran que, al igual que los resultados de abundancia relativa, la especie con mayor

frecuencia a nivel ejido fue *Opuntia streptacantha*, con el 14.3 %, seguida de *Ipomoea wolcottiana* con 8.7 % y *Acacia pennatula* con 8.5 %. Las especies con menor frecuencia fueron *Agave karwinskii*, *Bursera aloexylon*, *B. aptera*, *Cassia emarginata*, *Conzattia multiflora*, *Cyrtocarpa procera*, *Heliocarpus terebinthinaceus* y *Lysiloma divaracata* con alrededor del 0.30 % cada una. La frecuencia relativa para *Bursera bipinnata* fue de 5 % y *B. copallifera* de 2.3 % (Tabla 2).

**Dominancia relativa.** Los resultados de dominancia relativa señalan que las especies más dominantes en la zona de estudio fueron principalmente arbóreas. *Ipomoea wolcottiana* fue la especie arbórea que alcanzó mayor cobertura del área de estudio, con el 20 %, seguida de *Ceiba aesculifolia* con el 18 % y *Bursera bipinnata* con el 10 %. *Lonchocarpus caudatus* fue la especie arbustiva que presentó mayor cobertura del área de estudio, con el 7 %. *Cassia emarginata*, *Agave karwinskii*, *Masdenia zimapanica*, *A. ghiesbreghtii*, *Echinocactus platyacanthus*, *Heliocarpus terebinthinaceus*, *Bursera aloexylon*, *Bunchosia lanceolata*, *Lysiloma divaracata*, *Bursera aptera*, *Pithecellobium acatlense* y *Stenocereus stellatus* fueron las especies menos dominantes con menos del 1 % de cobertura de copa (Tabla 2).

**Índice de valor de importancia (IVI).** La familia Fabaceae fue la que consiguió el mayor índice de valor de importancia, con el 34.3 %; seguida de la familia Cactaceae con 31.4 %. La especie *Opuntia streptacantha* fue la especie que mayor IVI obtuvo con 17 %, seguida de *Ipomoea wolcottiana* con 11 % y *Ceiba aesculifolia* con 7.6 %. *Agave karwinskii*, *Heliocarpus terebinthinaceus*, *Bursera aloexylon*, *Lysiloma divaracata*, *B. aptera* y *Cassia emarginata* fueron las especies que menor peso ecológico obtuvieron, con un IVI menor de 0.5 %.

La familia Burseraceae alcanzó un IVI de 8.8 %, siendo *Bursera bipinnata* la mejor representada con 5.5 %, en comparación con *Bursera copallifera* que obtuvo 2.6 % (Tabla 2).

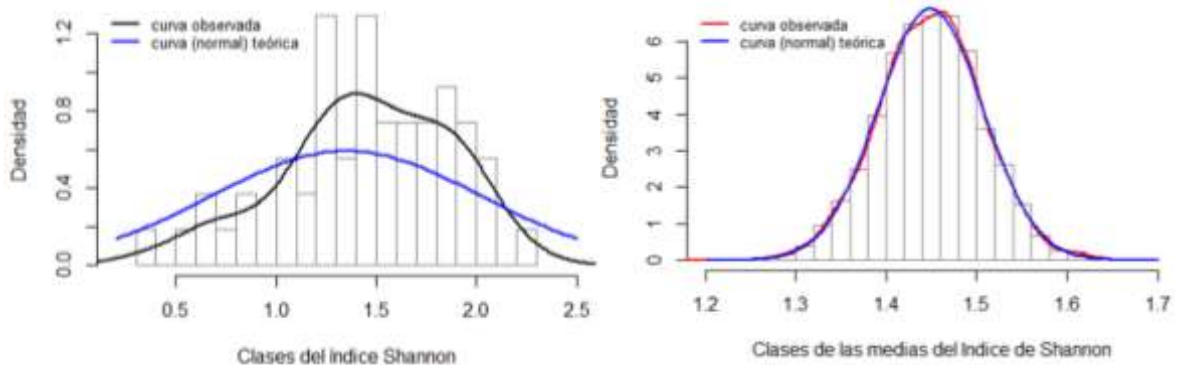
**Tabla 2.** Abundancia, Frecuencia, Dominancia, e Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies presentes en el ejido de San Juan Raboso, Izúcar de Matamoros, Puebla (ordenados de manera descendente de acuerdo con el valor de su IVI).

| Nombre científico               | Abundancia  |              | Frecuencia |              | Dominancia         |              | IVI          |
|---------------------------------|-------------|--------------|------------|--------------|--------------------|--------------|--------------|
|                                 | N/ha        | %            | Sitio      | %            | m <sup>2</sup> /ha | %            | %            |
| <i>Opuntia streptacantha</i>    | 609         | 34.0         | 49         | 14.3         | 119.6              | 2.6          | 17           |
| <i>Ipomoea wolcottiana</i>      | 74          | 4.1          | 30         | 8.7          | 920.3              | 20.2         | 11           |
| <i>Ceiba aesculifolia</i>       | 26          | 1.4          | 12         | 3.5          | 808.2              | 17.7         | 7.6          |
| <i>Acacia pennatula</i>         | 113         | 6.3          | 29         | 8.5          | 227.1              | 5.0          | 6.6          |
| <i>Bursera bipinnata</i>        | 33          | 1.9          | 17         | 5.0          | 440.1              | 9.7          | 5.5          |
| <i>Lonchocarpus caudatus</i>    | 94          | 5.3          | 11         | 3.2          | 327.1              | 7.2          | 5.2          |
| <i>Stenocereus griseus</i>      | 96          | 5.4          | 24         | 7.0          | 108.9              | 2.4          | 4.9          |
| <i>Stenocereus stellatus</i>    | 104         | 5.8          | 27         | 7.9          | 39.9               | 0.9          | 4.8          |
| <i>Acacia farnesiana</i>        | 69          | 3.8          | 24         | 7.0          | 155.5              | 3.4          | 4.7          |
| <i>Echinocactus</i>             | 148         | 8.3          | 18         | 5.2          | 18.6               | 0.4          | 4.6          |
| <i>Mimosa benthami</i>          | 70          | 3.9          | 11         | 3.2          | 159.7              | 3.5          | 3.5          |
| <i>Piptadenia viridiflora</i>   | 46          | 2.6          | 13         | 3.8          | 192.4              | 4.2          | 3.5          |
| <i>Acacia coulteri</i>          | 30          | 1.7          | 14         | 4.1          | 209.4              | 4.6          | 3.4          |
| <i>Bunchosia lanceolata</i>     | 91          | 5.1          | 12         | 3.5          | 25.6               | 0.6          | 3.0          |
| <i>Acacia cochiliacantha</i>    | 59          | 3.3          | 12         | 3.5          | 67.0               | 1.5          | 2.8          |
| <i>Bursera copallifera</i>      | 15          | 0.8          | 8          | 2.3          | 205.3              | 4.5          | 2.6          |
| <i>Styphnolobium</i>            | 9           | 0.5          | 5          | 1.5          | 147.3              | 3.2          | 1.7          |
| <i>Pithecellobium acatlense</i> | 24          | 1.3          | 8          | 2.3          | 42.5               | 0.9          | 1.5          |
| <i>Agave ghiesbreghtii</i>      | 26          | 1.4          | 5          | 1.5          | 20.4               | 0.4          | 1.1          |
| <i>Cyrtocarpa procera</i>       | 2           | 0.1          | 1          | 0.3          | 105.1              | 2.3          | 0.9          |
| <i>Masdenia zimapanica</i>      | 17          | 0.9          | 4          | 1.2          | 10.6               | 0.2          | 0.8          |
| <i>Celtis caudata</i>           | 6           | 0.3          | 2          | 0.6          | 47.5               | 1.0          | 0.6          |
| <i>Conzattia multiflora</i>     | 2           | 0.1          | 1          | 0.3          | 46.0               | 1.0          | 0.5          |
| <i>Cassia emarginata</i>        | 17          | 0.9          | 1          | 0.3          | 2.1                | 0.05         | 0.4          |
| <i>Bursera aptera</i>           | 2           | 0.1          | 1          | 0.3          | 36.4               | 0.8          | 0.4          |
| <i>Lysiloma divaricata</i>      | 2           | 0.1          | 1          | 0.3          | 29.4               | 0.6          | 0.3          |
| <i>Bursera aloexylon</i>        | 2           | 0.1          | 1          | 0.3          | 23.3               | 0.5          | 0.3          |
| <i>Heliocarpus</i>              | 4           | 0.2          | 1          | 0.3          | 18.2               | 0.4          | 0.3          |
| <i>Agave karwinskii</i>         | 4           | 0.2          | 1          | 0.3          | 4.2                | 0.1          | 0.2          |
|                                 | <b>1793</b> | <b>100.0</b> | <b>343</b> | <b>100.0</b> | <b>4557.8</b>      | <b>100.0</b> | <b>100.0</b> |

### 5.5.3 Medida de la diversidad de especies

**Riqueza de especies.** La diversidad en una comunidad vegetal se puede definir como un conjunto de especies, donde cada una se encuentra representada por determinado número de individuos, es decir, cada especie tiene un valor de abundancia que la caracteriza (Begon et al., 1996). En las 54 unidades de muestreo se encontraron un total de 968 individuos, con una riqueza específica de 29 especies.

**Índice de Shannon-Wiener.** El valor promedio observado en las muestras ( $n = 54$ ) del índice de Shannon-Wiener en el ejido de San Juan Raboso fue  $H_{media} = 1.44759$  con una desviación estándar  $H_{sd} = 0.4221396$ , y un máximo y mínimo de  $H_{Máx} = 2.243153$  y  $H_{Mín} = 0.3488321$ , respectivamente. Su distribución empírica mostró una ligera asimetría negativa. En la figura 10 se muestra el histograma de los valores observados sobreponiéndoles la distribución normal esperada. La prueba de bondad de ajuste (Lilliefors) verifica que los datos observados en la muestra aleatoria se ajustan a una distribución normal, con un nivel de significancia del 0.05 ( $p - valor = 0.7898 < 0.05$ ). La media estimada del parámetro bootstrap fue  $\bar{H}^* = 1.44813$ , con una desviación típica de la distribución bootstrap de  $\sigma_H^* = 0.05784422$  y un sesgo de 0.00054 [ $abs(H_{media} = 1.44759 - \bar{H}^* = 1.44813)$ ]. Su intervalo de confianza al 95% fue ( $1.332 < \bar{H}^* < 1.556$ ) con una amplitud de 0.224.



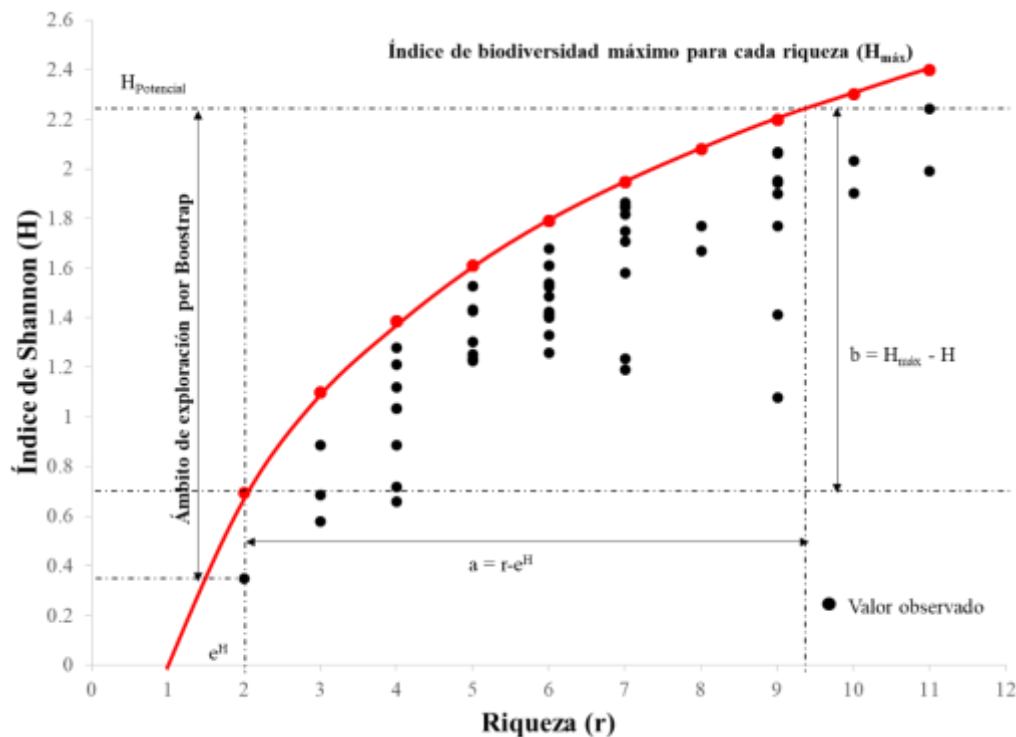
a) Distribución observada  $H$

b) Distribución bootstrap de  $\bar{H}^*$

**Figura 10.** Distribución observada y ajuste de la distribución normal en el área de estudio.

En la figura 11 se muestra el índice de Shannon-Wiener esperado en condiciones de máxima equidad ( $H_{m\acute{a}x} = \ln S$ ). Los desvíos horizontales ( $a = r - e^H$ : diferencias entre la riqueza observada y la esperada en condiciones de máxima equidad) indican el número de especies presentes en el ejido de San Juan Raboso que no ha alcanzado su equidad máxima respecto al número de especies necesarias para que el índice de Shannon observado fuera máximo. Los desvíos verticales ( $b = H_{M\acute{a}x} - H$ : diferencias de índices de Shannon) indican cuánto de la diversidad alcanzable con equidad máxima no se expresó en la comunidad observada. El eje de la riqueza se definió en uno, ya que en toda comunidad habrá al menos una especie presente, con índice de Shannon cero: la biodiversidad es nula porque existe una única especie.

Para el valor promedio  $H_{media} = 1.44759$  se espera la presencia de cuatro especies, para el valor máximo  $H_{M\acute{a}x} = 2.243153$  y mínimo en  $H_{M\acute{i}n} = 0.3488321$ , se esperan 10 y dos especies respectivamente.

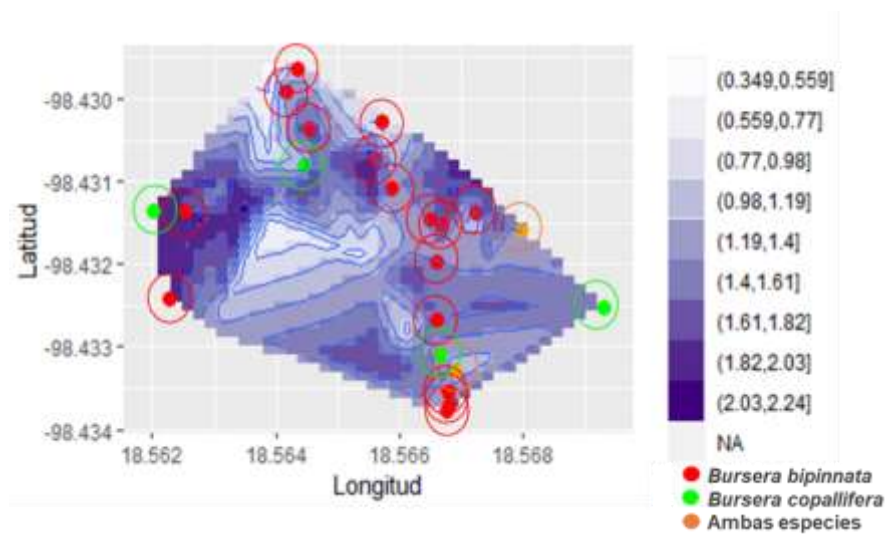


**Figura 11.** Índice de Shannon en función de la riqueza.  $a = [r - e^H]$ , diferencia entre riqueza observada y equiabundante;  $H_{Máx} - H$ , diferencia entre diversidad esperada y observada.

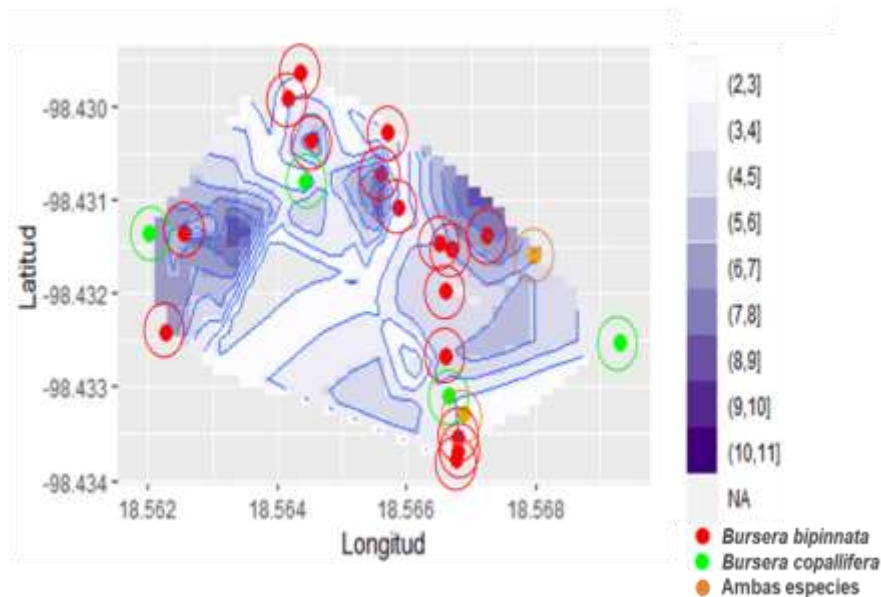
En la figura 12 a) y b) se observa los valores obtenidos del índice de Shannon y la riqueza específica para el ejido de San Juan Raboso. Colores claros indican sitios con valores de Shannon bajos, es decir, la presencia de pocas especies, ( $H_{Mín} = 0.3488321$ , ~dos especies) que significa que estos sitios tienen un grado de incertidumbre bajo, por lo que la probabilidad de elegir un individuo de la especie dominante será cercana a uno, mayor que para cualquier otra especie. Sin embargo, la diferencia entre  $e^H$  y  $r$  es mayor (Fig. 11), lo que significa que los sitios tienen menos diversidad. Colores oscuros revelan sitios con valores de Shannon altos, es decir, la presencia del número máximo de especies ( $H_{Máx} = 2.243153$ , ~10 especies) que significa que estos sitios tienen un grado de incertidumbre alto, por lo que la probabilidad de elegir un individuo de la especie dominante será la misma para cualquier especie. En contraste, la

diferencia entre  $e^H$  y  $r$  es menor (Fig. 11), lo que significa que los sitios tienen mayor diversidad.

Las figuras 12 a) y b) también muestran la distribución de las especies *Bursera bipinnata* y *Bursera copallifera* en color rojo y verde respectivamente, y en color naranja cuando ambas especies se encuentran presentes, en las 54 unidades de muestreo. La presencia de estas especies sobresale en áreas con índices de Shannon que oscilan al valor promedio,  $H_{media} = 1.44759$ ,  $\sim$  cuatro especies.



a) Índices de Shannon



b) Riqueza

**Figura 12.** Interpolación de la riqueza, índices de Shannon-Weiner y distribución de las especies *Bursera bipinnata* y *Bursera copallifera* en las 54 unidades muestrales.

## 5.6 Discusión

### 5.6.1 Composición florística

Los resultados obtenidos del presente estudio indican que la familia con mayor diversidad (géneros y especies) fue Fabaceae que coincide con estudios desarrollados en bosques tropicales caducifolios en zonas cálidas (Guillermo-Sandoval et al., 2021; Méndez-Toribio et al., 2014).

El número de especies de las familias Burseraceae y Cactaceae fue de cuatro especies para cada una. Valores que son similares en el estudio realizado en el bosque tropical caducifolio en la depresión del Balsas de Michoacán, con siete y cuatro especies respectivamente. Áreas en donde también el bosque tropical caducifolio se ve amenazado por actividades humanas, principalmente por

aquellas que generan recursos económicos, como es el caso de la construcción de la presa Gral. Francisco J. Mugica, Sin dejar de lado a la ganadería y el desarrollo de nuevos cultivos, actividades económicas que también ponen en riesgo la conservación del bosque tropical caducifolio (Martínez-Cruz et al., 2013).

*Bursera* y *Acacia* son los géneros con mayor número de especies en el ejido de San Juan Raboso, con cuatro especies cada uno. El primero, destacando por su endemismo y diversificación perteneciente a la cuenca del Balsas, una de las principales extensiones del bosque seco (Becerra, 2005). El segundo, calificado como un género de extensa distribución y con amplia preferencia por el bosque tropical caducifolio (Méndez-Toribio et al., 2014).

### 5.6.2 Índice estructural IVI

**Abundancia relativa.** Las especies *Opuntia streptacantha* y *Echinocactus platyacanthus*, pertenecientes a la familia Cactaceaea, fueron las más abundantes. Esta familia forma parte de la fisionomía de ciertas variantes del bosque tropical caducifolio (Trejo, 2005), ya que posee características morfológicas y fisiológicas que le ha permitido distribuirse tanto en ambientes áridos como en cálidos (Durán y Méndez, 2010). La especie *Acacia pennatula* también ocupó un lugar importante en cuanto a la abundancia de especies en el área de estudio, debido a que pertenece a una de las familias más diversas en este tipo de vegetación (Rojas-Martínez y Flores-Olvera, 2019).

La presencia de las especies *Bursera bipinnata* y *B. copallifera*, de las que se extrae el copal, es característico de los bosques tropicales caducifolios, sin embargo, su abundancia no fue representativa respecto a *Opuntia streptacantha* y *Echinocactus platyacanthus*. Esto se debe principalmente a factores tanto ecológicos como antropogénicos. El primero, definido por variables climáticas que determinan su distribución, y el segundo determinado

por el grado de aprovechamiento que los habitantes de la comunidad ejercen sobre las poblaciones naturales de copal (Hernández-Pérez et al., 2011).

**Frecuencia relativa.** Las especies *Opuntia streptacantha*, *Ipomoea wolcottiana*, *Acacia pennatula* y *Stenocereus stellatus* fueron las que más frecuencia obtuvieron. Tal y como se mencionó anteriormente, la familia Cactaceae debido a sus características morfológicas y fisiológicas es representativa del bosque tropical caducifolio (Durán y Méndez, 2010). La especie *Ipomoea wolcottiana*, coincide con lo reportado por Alcántar-Mejía et al. (2012) quienes encontraron una gran afinidad de este género con el bosque tropical caducifolio, en contraste con otros tipos de vegetación. La especie *Acacia pennatula*, de acuerdo con Rojas-Martínez y Flores-Olvera (2019) es también una especie característica del bosque tropical caducifolio.

**Dominancia relativa.** Los resultados obtenidos en este estudio son similares con los reportados por Alcántar-Mejía et al. (2012), en el que las especies del género *Ipomoea* tienen mayor afinidad por las zonas cálidas secas. Es importante resaltar la dominancia de las especies arbóreas en el bosque tropical caducifolio, así como la contribución estructural de otras formas de vida, como los arbustos y cactus. El área estudiada exhibe  $4\,557.8\text{ m}^2\text{ ha}^{-1}$  de cobertura, lo que se traduce en que más del 50 % de ésta, se encuentra desprovista de vegetación, lo que puede deberse a que en la mayor parte se encontró una baja riqueza de especies, principalmente áreas con presencia de dos hasta cinco, y algunas áreas presentaron de seis hasta 10, lo que indica sobreexplotación, cambios en la estructura de la comunidad y falta de regeneración natural (Trejo, 2005).

**Índice de valor de importancia (IVI).** Las especies *Opuntia streptacantha*, *Ipomoea wolcottiana* y *Ceiba aesculifolia* fueron las especies de mayor peso ecológico en el área de estudio. Sin embargo, estos resultados difieren con lo documentado por Alanís et al. (2010) y Hernández et al. (2011) en el bosque

tropical caducifolio de San Luis Potosí y Morelos. En el primer estudio, el género de mayor peso ecológico fue *Lysiloma* y la especie más representativa *Lysiloma divaricata* con un IVI de 39.98 %, lo que puede explicarse porque el área de estudio tiene historial de uso antropogénico y los productores locales tienen el hábito de mantener las especies arbóreas de este género en sus fincas para el establecimiento de cercas vivas. En el segundo caso, la especie *Lysiloma divaricata* es una de las especies que también presentó la mayor importancia ecológica en las tres UMA's de la sierra de Huautla, Morelos, sobresaliendo por su abundancia, importancia antropogénica y fuente de alimento para la fauna silvestre.

Las especies *Bursera bipinnata* y *B. copallifera* presentaron valores de IVI bajos (5.5 % y 2.6 %), lo que difiere por lo reportado por Sánchez et al. (2018), donde *B. copallifera* es una de las especies con valor de IVI más alto, con 18.03 %, en el bosque tropical caducifolio de San Luis Potosí. Lo anterior puede deberse a la sobreexplotación de estas especies para la extracción de copal, originando su baja abundancia y frecuencia en las unidades de muestreo, lo que puede cambiar la estructura y el desarrollo de este tipo de vegetación (Hernández-Pérez et al., 2011; Trejo, 2005).

### 5.6.3 Medida de la diversidad de especies

**Riqueza de especies.** La riqueza de especies manifiesta diversos aspectos de la biodiversidad (Moreno, 2001).

**Índice de Shannon-Wiener.** Es uno de los índices más empleados para medir la biodiversidad. Se basa en el número de especies y su abundancia relativa (Pla, 2006). El índice  $H'$  aumenta a medida que incrementa la riqueza (número de especies), y cuando los individuos se distribuyen más homogéneamente entre todas las especies presentes (Somarriba, 1999). La máxima equidad hace referencia a que todas las especies contengan el mismo número de individuos

(Pla, 2006). El índice de Shannon-Wiener indicó que en el área de estudio no se alcanzó la máxima equidad, ya que no todas las especies encontradas presentaron igual abundancia y algunas fueron más abundantes que otras, lo que refleja una alteración en la estructura del ecosistema, debido principalmente a factores antropogénicos (Aguirre, 2013).

El valor promedio de índice de Shannon-Wiener ( $H_{media} = 1.44759, \sim 4 \text{ especies}$ ) para el ejido de San Juan Raboso indica que escasamente se encuentra considerada como de diversidad media de acuerdo con la clasificación propuesta por Aguirre (2013). La diferencia de riqueza entre el valor promedio de índice de Shannon correspondiente a cuatro especies y el valor máximo esperado de 10 puede ser ocasionado por el intenso aprovechamiento de resina de copal para la obtención de ingresos económicos (Linares y Bye, 2008). Una diversidad media también se documentó en el estudio desarrollado en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla (REBIOSH) obteniendo un valor promedio de índice de Shannon-Wiener de 1.6. La REBIOSH reúne la mayor diversidad del estado de Morelos, y aunque es un área natural protegida no asegura la conservación de la diversidad (Sánchez et al., 2018). En el bosque tropical caducifolio en Tzirtzícuaró depresión del Balsas en Michoacán también se reportó una diversidad media (Méndez-Toribio et al., 2014). Los resultados difieren con lo reportado por Alanís et al. (2010) en el bosque tropical caducifolio en San Luis potosí, en la que se documentó una diversidad alta, lo que puede ser explicado debido a que los sitios de muestreo se establecieron en áreas sin evidencias de disturbio.

El ecosistema está formado por diversos componentes que son pieza clave para su adecuado funcionamiento, y la pérdida de alguno de ellos puede influir en su operatividad. Por lo que resulta importante conocer el índice de Shannon-Wiener como medida de la diversidad de especies, ya que la pérdida de la biodiversidad degrada la funcionalidad del ecosistema, y en casos drásticos puede conducir a extensiones masivas o al colapso del ecosistema. La

ausencia de un componente del sistema a menudo pesa mucho más al momento de que una determinada población se mantenga o desaparezca (Ulanowicz, 2009, 2011).

## **5.7 Conclusiones**

La presente investigación pone en evidencia que la selva baja caducifolia de Puebla engloba una riqueza de especies que presentan un valioso capital natural, entre las que sobresalen las especies del género *Bursera*, de las que se extrae la resina aromática denominada copal. La especie con mayor valor de importancia fue *Opuntia streptacantha* al ser la especie más abundante y la de mayor frecuencia, debido a que la familia Cactaceae forma parte de la fisionomía de ciertas variantes del bosque tropical caducifolio. Los valores de diversidad mostraron para el área de estudio una diversidad media, tendiendo a baja, ya que se encontró una baja riqueza de especies y no se alcanzó la máxima equidad. Esto fue debido a que las especies encontradas presentaron diferentes abundancias causado principalmente por la presión que las actividades humanas están ejerciendo sobre este tipo de vegetación, como es el caso del aprovechamiento tan intensivo que se hace sobre los copales, provocando graves daños y ocasionando una recuperación lenta e incluso nula del arbolado. Por lo que, realizar este tipo de estudios permite conocer el estado detallado en que se encuentran las comunidades vegetales, y servir como base para futuras investigaciones en las que se propongan estrategias de manejo adecuados y sostenible para los recursos que alberga este tipo de vegetación.

## **5.8 Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de la presente investigación.

## 5.9 Literatura citada

- Aguirre, Z. (2013). Guía de métodos para medir la biodiversidad. [PDF]. <https://zhofreaquirre.files.wordpress.com/2012/03/guia-para-medir-biodiversidad-octubre-7-2011.pdf>
- Alanís, R. E., Aranda, R. R., Mata, B. J. M., Canizales, V. P. A., Uvalle, S. J. I., Valdecantos, D. A. y Ruíz, B. M. G. (2010). Riqueza y diversidad de especies leñosas del bosque tropical caducifolio en San Luis Potosí, México. *Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León*, 13(3), 287-294.
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Valdecantos-Dema, A., Pando-Moreno, M., Aguirre-Calderón, O. y Treviño-Garza, E. J. (2011). Caracterización de regeneración leñosa post-incendio de un ecosistema templado del parque ecológico chipinque, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 31-39. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.032>
- Alcántar-Mejía, J., Carranza-González, E., Cuevas-García, G. y Cuevas-García, E. (2012). Distribución geográfica y ecológica de Ipomoea (Convolvulaceae) en el estado de Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(3), 731-741. <http://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2012.3.1263>
- Badii, M. H., Guillen, A., Rodríguez, C. E., Lugo, O., Aguilar, J. y Acuña, M. (2015). Pérdida de biodiversidad: causas y efectos. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(2), 156-174.
- Becerra, J. X. (2005). Timing the origin and expansion of the Mexican tropical dry forest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(31), 10919-10923. <https://doi.org/10.1073/pnas.0409127102>
- Begon, M., Mortimer, M. y Thompson, D. (1996). *Population Ecology. A unified study of animal and plants* (3ª ed.). Oxford, Inglaterra: Blackwell Science Publishing.
- Cayuela, L. (2006). Desforestación y fragmentación de bosques tropicales montanos en los altos de Chiapas, México. Efectos sobre la diversidad de árboles. *Ecosistemas*, 15(3), 191-196.
- Couttolenc-Brenis, E., Cruz-Rodríguez, A., Cedillo, P. E. y Musálem, M. A. (2005). Uso local y potencial de las especies arbóreas en Camarón de Tejeda, Veracruz. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 11(1), 45-50.
- Durán, G. R., & Méndez, G. M. E. (2010). Selva baja caducifolia con cactáceas candelabrifórmes. En R. Durán y M. Méndez (Eds.), *biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (496 pp). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.

- Efron, B. (1979). Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1), 1-26. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>
- Gallardo-Cruz, J. A., Meave, J. A. y Pérez-García, E. A. (2005). Estructura, composición y diversidad de la selva baja caducifolia del Cerro Verde, Nizanda (Oaxaca), México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (76), 19-35. <https://doi.org/10.17129/botsci.1701>
- García, N. R. M., Sánchez, V. A., Hernández, M. M. A. y Reséndiz, F. N. S. (2014). Estudio descriptivo de diversidad florística y usos de árboles y arbustos nativos del sureste de Guanajuato. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria de México*, 2(2), 24-31.
- González E. M., Ramírez, M. N., Camacho, C. A., Holz, S. C., ReyBenayas, J. M. y Parra, V. M. R. (2007). Restauración de bosque en territorios indígenas de Chiapas: modelos ecológicos y estrategias de acción. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, Sup(80), 11-23.
- Guillermo-Sandoval, E. E., Leopardi-Verde, C., Cayetano-Ramírez, F., Alvarado-Segura, A. A. y Escobedo-Sarti, G. J. (2021). Composición y estructura florística de una porción de selva baja caducifolia en Tecmán, Colima, México. *Madera y Bosques*, 27(1), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712091>
- Guízar-Nolazco, E., Granados-Sánchez, D. y Castañeda-Mendoza, A. (2010). Flora y vegetación en la porción sur de la mixteca poblana. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 95-118. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.019>
- Hernández, S. D. A., Cortés, D. E., Zaragoza, R. J. L., Martínez, H. P. A., González, B. G. T., Rodríguez, C. B. y Hernández, S. D. A. (2011). Hábitat del venado cola blanca en la sierra de Huautla, Morelos, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 27(1), 47-66.
- Hernández-Pérez, E., González-Espinosa, M., Trejo, I. y Bonfil, C. (2011). Distribución del género *Bursera* en el estado de Morelos, México y su relación con el clima. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(3), 964-976. <http://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.3.694>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México [INEGI]. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Puebla. Puebla: INEGI.
- Linares, E. y Bye, R. (2008). El copal en México. *Biodiversitas*, (78), 8-11.
- Lozada, D. J. R. (2010). Consideraciones metodológicas sobre los estudios de comunidades forestales. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 77-88.
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. New Jersey: Princeton University Press.

- Martínez-Cruz, J., Méndez-Toribio, M., Cortés-Flores, J., Coba-Pérez, P., Cornejo-Tenorio, G. y Ibarra-Manríquez, G. (2013). Estructura y diversidad de los bosques estacionales desaparecidos por la construcción de la presa Gral. Francisco J. Múgica, en la Depresión del Balsas, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(4), 1216-1234. <https://doi.org/10.7550/rmb.33799>
- Meave, J. A., Romero-Romero, M. A., Salas-Morales, S. H., Pérez-García, E. A. y Gallardo-Cruz, J. A. (2012). Diversidad, amenazas y oportunidades para la conservación del bosque tropical caducifolio en el estado de Oaxaca, México. *Ecosistemas*, 21(1-2), 85-100.
- Méndez-Toribio, M., Martínez-Cruz, J., Cortés-Flores, J., Rendón-Sandoval, F. J. y Ibarra-Manríquez, G. (2014). Composición, estructura y diversidad de la comunidad arbórea del bosque tropical caducifolio en Tziritzícuar, Depresión del Balsas, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(4), 1117-1128. <http://dx.doi.org/10.7550/rmb.43457>
- Mora-Donjuán, C. A., Rubio-Camacho, E. A., Alanís, Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Mata-Balderas, J. M. y Mora-Olivo, A. (2014). Composición y diversidad vegetal de un área de matorral desértico micrófilo con historial pecuario en el noreste de México. *Polibotánica*, (38), 53-66.
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad* (1ª ed.). M&T–Manuales y Tesis SEA.
- Moreno-Casasola, P. y Paradowska, K. (2009). Especies útiles de la selva baja caducifolia en las dunas costeras del centro de Veracruz. *Madera y bosques*, 15(3), 21-44. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1531184>
- Paredes, O. A., Razo, Z. R., Rodríguez, L. R. y Suárez, I. A. (2019). Diversidad de especies arbóreas y arbustivas del ejido El Puente, Mineral del Chico, Hidalgo. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 6(4), 93-105.
- Pennington, T. D. y Sarukhán, J. (2005). *Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies* (3ª ed.). Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo de Cultura Económica.
- Pineda-García, F., Arredondo-Amezcu, L. y Ibarra-Manríquez, G. (2007). Riqueza y diversidad de especies leñosas del bosque tropical caducifolio El Tarimo, cuenca del Balsas, Guerrero. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 78(1), 129-139. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2007.001.396>
- Pla, L. (2004). Bootstrap confidence intervals for the Shannon biodiversity index: A simulation study. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 9(1), 42-56. <https://doi.org/10.1198/1085711043136>

- Pla, L. (2006). Biodiversidad: inferencia sobre riqueza e índice de Shannon. *Interciencia*, 31(8), 583-590.
- Pla, L. y Matteucci, S. D. (2001). Intervalos de confianza bootstrap del índice de biodiversidad de Shannon. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 18(3), 222-234.
- Rojas-Martínez, C. y Flores-Olvera, H. (2019). Florística de la sierra el pelado, Acatlán, Puebla, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, 1-26. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2694>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1ª ed. digital). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Rzedowski, J. y Calderón de Rzedowski, G. (2013). Datos para la apreciación de la flora fanerogámica del bosque tropical caducifolio de México. *Acta Botánica Mexicana*, (102), 1-23. <https://doi.org/10.21829/abm102.2013.229>
- Sánchez, H. M. A., Fierros, G. A. M., Velázquez, M. A., De los Santos, P. H. M., Aldrete, A. y Cortés, D. E. (2018). Estructura, riqueza y diversidad de especies de árboles en un bosque tropical caducifolio de Morelos. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46), 131-153. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.115>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2010). 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. Diario Oficial de la Federación 30 diciembre, 2010. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-059-semarnat-2010>
- Soler, P. E., Berroterán, J. L., Gil, J. L. y Acosta, R. A. (2012). Índice de valor de importancia, diversidad y similaridad florística de especies leñosas en tres ecosistemas de los llanos centrales de Venezuela. *Agronomía Tropical*, 62(1-4), 25-37.
- Somarriba, E. (1999). Diversidad Shannon. *Agroforestería en las Américas*, 6(23), 72-74.
- Trejo, I. (2005). Análisis de la diversidad de la selva baja caducifolia en México. En G. Halffter, J. Soberón, P. Koleff y A. Melic (Eds.), *Sobre la diversidad biológica: el significado de las diversidades alfa, beta y gama* (pp. 111-122). Zaragoza, España: Monografías Tercer Milenio.
- Ulanowicz, R. E. (2009). The dual nature of ecosystem dynamics. *Ecological Modelling*, 220(16), 1886-1892. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.04.015>.

- Ulanowicz, R. E. (2011). Towards Quantifying a Wider Reality: Shannon Exonerata. *Information*, 2(4), 624-634.  
<https://doi.org/10.3390/info2040624>
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gasta, F., Mendoza, H., Ospina, M. y Umaña, A. M. (2006). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad* (2ª ed.). Programa de inventarios de biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt.

## **6 APLICACIÓN DE UN MODELO DE BOSQUE ALEATORIO PARA EXPLICAR LA PRODUCCIÓN DE RESINA EN ÁRBOLES DE COPAL (*Bursera* spp.)**

### **APPLICATION OF A RANDOM FOREST MODEL TO PREDICT RESIN PRODUCTION IN COPAL (*Bursera* spp.) TREES**

**Selene del Carmen Arrazate-Jimenez<sup>1</sup>; Rosa María García Núñez<sup>1</sup>; Julio  
César Buendía Espinoza<sup>1</sup>; Alejandro Sánchez Vélez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Universidad Autónoma Chapingo. Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, CP 56230 Texcoco, México. Email: [arrazate.jimenez13@gmail.com](mailto:arrazate.jimenez13@gmail.com); [blondynunez@gmail.com](mailto:blondynunez@gmail.com); [jcbuendiae@hotmail.com](mailto:jcbuendiae@hotmail.com).*

<sup>2</sup>*Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, CP 56230 Texcoco, México. Email: [dr.zhivago2014@gmail.com](mailto:dr.zhivago2014@gmail.com).*

#### **6.1 Resumen**

Los productos forestales no maderables son esenciales para el desarrollo de las comunidades, pero su enorme demanda ha provocado una amenaza grave para los árboles que crecen en sus áreas de distribución natural. La resina de copal es uno de estos productos, que tiene gran importancia religiosa y ceremonial tanto en México como en muchos otros países. Para determinar la cantidad de resina que se puede extraer de un árbol, hay que considerar sus características morfológicas, fisiológicas y estado físico y sanitario. El bosque aleatorio (conocido en inglés como Random Forest, RF) es un algoritmo progresivo no lineal, que puede combinar todos los factores relativos para obtener una explicación y predicción precisa. En este estudio se propuso una metodología para determinar la producción y condición de los árboles de copal, y se desarrolló un modelo de RF para explicar la producción de resina utilizando parámetros de dasometría y de condición. El experimento se desarrolló en la microcuenca Agua Escondida, en Puebla, México. El modelo alcanzó una

precisión media del 99 % con un índice Kappa del 98 % con los datos de entrenamiento, y del 71 % y 47 % con los datos de validación. La condición del árbol fue la variable más importante para determinar la producción de resina en los árboles de copal, seguida del diámetro del tallo (33 y 38 cm), la altura (2 y 2.5 m) y el diámetro de las ramas secundarias (de 8 a 15 cm, 22 y 32 cm).

**Palabras clave:** condición, producto forestal no maderable, sobreexplotación, variables dasométricas.

## 6.2 Abstract

Non-timber forest products are essential for community development, but their enormous demand has caused a serious threat to trees grow in their natural distribution areas. Copal resin is one of these products, which has great religious and ceremonial importance in Mexico as well as in many other countries. To determine the amount of resin that can be extracted from a tree, it is necessary to consider its morphological and physiological characteristics and its physical and sanitary condition. The Random Forest (RF) is a progressive nonlinear algorithm, which can combine all relative factors to obtain an accurate explanation and prediction. In this study, a methodology was proposed to determine the production and condition of copal trees, and an RF model was developed to explain resin production using dasometry and condition parameters. The experiment was conducted in the Agua Escondida microbasin in Puebla, Mexico. The model achieved an average accuracy of 99 % with a Kappa index of 98 % with the training data, and 71 % and 47 % with the validation data. Tree condition was the most important variable in determining resin production in copal trees, followed by stem diameter (33 and 38 cm), height (2 and 2.5 m) and diameter of secondary branches (8 to 15 cm, 22 and 32 cm).

**Key words:** condition, non-timber forest product, overexploitation, dasometric variables.

## 6.3 Introducción

Los productos forestales no maderables (PFNM) son cualquier parte de especies vegetales o animales procedentes de los bosques, diferente de la madera, los cuales son aprovechados por la sociedad humana (Wong et al., 2001). Existe una amplia diversidad de PFNM, entre las categorías reconocidas se encuentran las fibras, gomas, ceras, rizomas, tierra de monte y resinas (Tapia-Tapia y Reyes-Chilpa, 2008). Los bosques tropicales caducifolios

albergan una gran cantidad de PFM de gran importancia para el desarrollo de las comunidades rurales que habitan en o cerca de los bosques, los cuales son aprovechados constantemente (Jiménez et al., 2017; Tapia-Tapia y Reyes-Chilpa, 2008). La resina de copal es de los PFM más utilizados en este tipo de vegetación, proveniente de especies del género *Bursera*. Este género es de los más característicos en los bosques caducifolios tropicales mexicanos (Rzedowski y Calderón de Rzedowski, 2013), destacando *Bursera bipinnata* y *Bursera copallifera* como las especies que producen la resina de mayor valor para los copaleros (Linares y Bye, 2008). Además, el copal es una resina con importancia tanto económica como religiosa-ceremonial, en los templos se quema copal como medio de purificación (Linares y Bye, 2008) y se considera como alimento divino presente en los rituales de ofrenda (Montúfar, 2016). No obstante, numerosos factores amenazan la permanencia de las especies productoras de copal dentro de la comunidad vegetal. Por ejemplo, el sobrepastoreo reduce el número de plántulas que reemplazarán a los árboles más grandes (Cruz et al., 2006), y la demanda del producto hace que se ignoren los tiempos de extracción y descanso necesarios para la recuperación del árbol después de la cosecha (Linares y Bye, 2008). Otra causa a considerar en la disminución de las poblaciones naturales, con posibles implicaciones ecológicas y económicas (May, 2016), es el método de extracción; éste es un método ineficiente de corte, donde al extraer la resina se vulnera a los árboles ante el ataque de plagas y enfermedades.

Las Normas Oficiales Mexicanas para el aprovechamiento de la resina de copal exigen que se elaboren planes de manejo que incluyan un inventario y un cálculo de rendimiento (Anastacio-Martínez et al., 2016). Sin embargo, como los árboles de copal se encuentran generalmente en propiedades comunales o ejidales, donde se reúnen muchos extractores, no existe una organización formal y los productores no siguen sistemas adecuados para el aprovechamiento sostenible del recurso. Además, faltan estudios que

especifiquen la cantidad de resina que se puede extraer de un árbol tomando en cuenta sus características morfológicas y fisiológicas (Purata, 2008). En la región de Izúcar de Matamoros, Puebla, como en muchas otras partes de México, el copal sigue siendo un elemento valioso de diferentes rituales religiosos, principalmente para el día de muertos. Sin embargo, su enorme demanda ha llevado a la sobreexplotación, causando graves daños a su hábitat natural (Linares y Bye, 2008).

Los métodos no paramétricos son muy atractivos para la clasificación, ya que pueden utilizarse con distribuciones de datos arbitrarias y sin la suposición de que se conozcan las formas de las densidades subyacentes (Duda et al., 2000). El bosque aleatorio (conocido en inglés como Random Forest, RF) es un algoritmo de aprendizaje automático supervisado no paramétrico de clasificación (Breiman, 2001) que es altamente preciso y robusto al ruido (Breiman, 2001; Hastie et al., 2009; Rodríguez-Galiano et al., 2012). El método RF también puede evaluar interacciones complicadas entre variables, ya que selecciona automáticamente las variables importantes, independientemente de cuántas variables se utilicen al principio, y no encuentra problemas de sobreajuste (Breiman, 2001; Archibald et al., 2009; Oliveira et al., 2012). En comparación con otros métodos no paramétricos, la configuración de un RF es sencilla, ya que no es necesario un ajuste sofisticado de los parámetros.

Por lo expuesto, los objetivos de este estudio fueron: (1) proponer factores e indicadores para estimar la condición y la producción de resina en árboles de copal, y (2) generar un modelo explicativo a través del algoritmo de aprendizaje automático supervisado no paramétrico de clasificación bosque aleatorio para identificar qué variables dasométricas y de condición de los árboles de copal determinan la producción de resina, en el ejido de San Juan Raboso, Izúcar de Matamoros, Puebla.

En el futuro, los resultados de este estudio pueden servir como base para determinar las variables morfológicas y fisiológicas más importantes de los árboles de copal que influyen en la producción de resina (Purata, 2008). Este estudio también permitirá conocer los valores óptimos de diámetro de tallo y ramas secundarias, y altura total de los árboles de copal para obtener la máxima producción de resina.

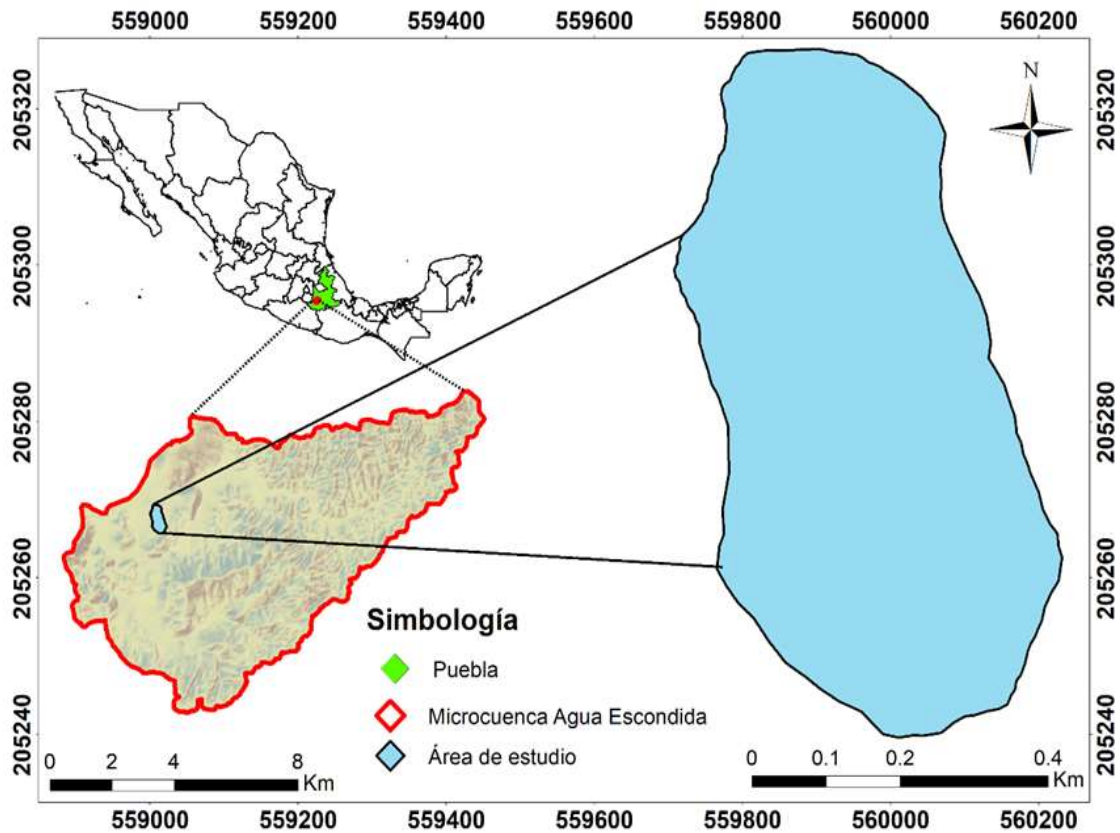
## **6.4 Materiales y métodos**

### **6.4.1 Área de estudio**

El área de estudio fue la microcuenca hidrográfica Agua Escondida. Se localiza al suroeste del estado de Puebla, abarca parte de los municipios de Izúcar de Matamoros, Epatlán, Ahuatlán y una pequeña parte de Xochiltepec. Cuenta con una superficie de 6492 ha. Pertenece a la región hidrográfica del Balsas, cuenca hidrográfica del Río Atoyac -A y a la subcuenca hidrográfica Huaquechula. Se ubica en la provincia del Eje Neovolcánico, las subprovincias de la sierra del sur de Puebla y lagos y volcanes de Anáhuac. A una altitud entre 1100 y 1600 m. Con un rango de temperatura de 19–25 °C y rango de precipitación entre 700–900 mm. Los suelos dominantes son los leptosol, vertisol y regosol. Presenta climas cálido subhúmedo con lluvias en verano y semicálido subhúmedo con lluvias en verano. El principal uso de suelo es la agricultura y el tipo de vegetación predominante es la selva baja caducifolia (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009a, 2009b, 2009c).

**Sitio Experimental.** El sitio experimental fue el ejido de San Juan Raboso en el municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla, en la zona denominada “cerro de la virgen”, dentro de la microcuenca hidrográfica Agua Escondida (**Figura 13**), con una elevación de 1282 m y un área de 30.8 ha. Los suelos predominantes son los leptosol y vertisol. El clima principal es cálido subhúmedo con lluvias en verano. Con un rango de temperatura de 18-26 °C y rango de precipitación de 700-900 mm (INEGI, 2009c). La vegetación predominante es el bosque tropical

caducifolio, característico de regiones con dos estaciones bien definidas de disponibilidad de humedad: la lluviosa y la seca (Rzedowski, 2006); así como, la presencia de especies que tiran sus hojas en la época seca del año y con



especies que presentan cortezas escamosas papiráceas o con protuberancias espinosas o corchosas, con copas poco densas y muy abiertas (Pennington y Sarukhán, 2005).

**Figura 13.** Localización del área de estudio, en la microcuenca hidrográfica Agua Escondida, Puebla, México.

#### 6.4.2 Variables Respuesta

**Producción de resina.** En la selección de árboles de copal para extracción de resina, la cantidad producida es el principal criterio, pero no existen métodos establecidos para estimarla. De acuerdo con los copaleros de la región y de

otras regiones (Montúfar, 2016; Abad-Fitz et al., 2020), las características morfológicas son determinantes en la producción de resina. La producción de resina de los árboles de copal se evaluó a través de diversos criterios de selección expuestos por los copaleros de la región. La producción de resina se clasificó como "alta", "media" o "baja" según la suma de indicadores determinados por el diámetro principal, altura total, diámetro de ramas secundarias 1 y 2, y condición actual de cada árbol de copal (**Tabla 3**). Su nemónico en el modelo fue "alta", "media" o "baja".

**Tabla 3.** Factores e indicadores para estimar la producción de resina en árboles de copal.

| Factor                                  |                 | indicador         |                 |
|-----------------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| <b>A. Diámetro principal</b>            | Fustal (3)      | Latizal (2)       | Vardascal (1)   |
|                                         | Mayor de 35 cm  | Entre 25-35 cm    | Menor de 25 cm  |
| <b>B. Altura total</b>                  | Alto (3)        | Medio (2)         | Bajo (1)        |
|                                         | Mayor de 200 cm | Entre 150-200 cm  | Menor de 150 cm |
| <b>C. Diámetro de ramas secundarias</b> | Grueso (3)      | Intermedio (2)    | Delgado (1)     |
|                                         | Mayor de 20 cm  | Entre 15-20 cm    | Menor de 15 cm  |
| <b>D. Condición</b>                     | Buena (3)       | Regular (2)       | Mala (1)        |
| <b>Suma de indicadores</b>              |                 | <b>Producción</b> | <b>Clave</b>    |
| 10-12                                   |                 | Alta              | 2               |
| 7-9                                     |                 | Media             | 1               |
| 4-6                                     |                 | Baja              | 0               |

### 6.4.3 Variables explicativas

**Condición.** La condición del arbolado es uno de los criterios más utilizados por los copaleros para la selección de los árboles que serán explotados. Este criterio engloba diversos factores estructurales del árbol que ayudan a definir su condición, sobresaliendo la apariencia, edad y estado del tronco (Abad-Fitz et al., 2020). La condición de los árboles de copal se evaluó con la metodología propuesta por Webster (1978) para determinar el estado del arbolado urbano, pero los factores e indicadores fueron adecuados al criterio de los copaleros de la región. El estado de los árboles se clasificó como "buena", "regular" o "mala" según la suma de indicadores determinados por el estado de la corteza del tronco, elongación de ramas, estructura de ramificación, daños por plagas, enfermedades y epífitas, así como el porcentaje de cobertura de copa (**Tabla 4**). Su nemónico en el modelo fue “buena”, “regular” y “mala”.

**Tabla 4.** Factores e indicadores para determinar la condición de árboles de copal a partir de la adaptación de la guía de condición de árboles urbanos (Webster, 1978).

| Factor                                    | Indicador                                                |                                                              |                                                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|                                           | Bueno (3)                                                | Regular (2)                                                  | Malo (1)                                               |
| <b>A. Estado de la corteza del tronco</b> | <10 % de pérdida de corteza y sin presencia de cavidades | >10 % y <50 % de pérdida de corteza y de una a dos cavidades | >50 % de pérdida de corteza y con tres o más cavidades |
|                                           | <b>Alta (3)</b>                                          | <b>Media (2)</b>                                             | <b>Baja (1)</b>                                        |
| <b>B. Elongación de ramas</b>             | Más de 15 cm de elongación de ramas                      | Entre 5 a 15 cm de elongación de ramas                       | Menos de 5 cm de elongación de ramas                   |
| <b>C. Estructura</b>                      | <b>Buena (3)</b>                                         | <b>Regular (2)</b>                                           | <b>Mala (1)</b>                                        |

|                                                     |                                                    |                                                                   |                                                                         |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>de ramificación</b>                              | Tallo principal y ramas secundarias en buen estado | Tallo principal y/o una rama secundaria muertas, rotas o ausentes | Tallo principal y dos o más ramas secundarias rotas, muertas o ausentes |
| <b>D. Daños por plagas enfermedad es y epífitas</b> | <b>Bajo (3)</b>                                    | <b>Medio (2)</b>                                                  | <b>Alto (1)</b>                                                         |
|                                                     | <10 %                                              | Entre el 10 y 30 %                                                | Más de 30 %                                                             |
| <b>E. Porcentaje de cobertura de copa</b>           | <b>Bueno (3)</b>                                   | <b>Regular (2)</b>                                                | <b>Malo (1)</b>                                                         |
|                                                     | > 60 %                                             | Entre el 20 y 60 %                                                | < 20 %                                                                  |
| <hr/>                                               |                                                    |                                                                   |                                                                         |
|                                                     | <b>Suma de indicadores</b>                         | <b>Condición</b>                                                  | <b>Clave</b>                                                            |
|                                                     | 12-15                                              | Buena                                                             | 2                                                                       |
|                                                     | 8-11                                               | Regular                                                           | 1                                                                       |
|                                                     | 5-7                                                | Mala                                                              | 0                                                                       |
| <hr/>                                               |                                                    |                                                                   |                                                                         |

***Diámetro del tallo principal.*** El diámetro del tallo principal es una de las características morfológicas más importantes de los árboles de copal a la hora de determinar la cantidad de resina extraída. Diámetros inferiores a 10 cm no son convenientes para la extracción por su bajo rendimiento y su explotación perjudicaría su capacidad productiva futura (Abad-Fitz et al., 2020; Fuentes, 2009). Su nemónico en el modelo fue “diámetro”.

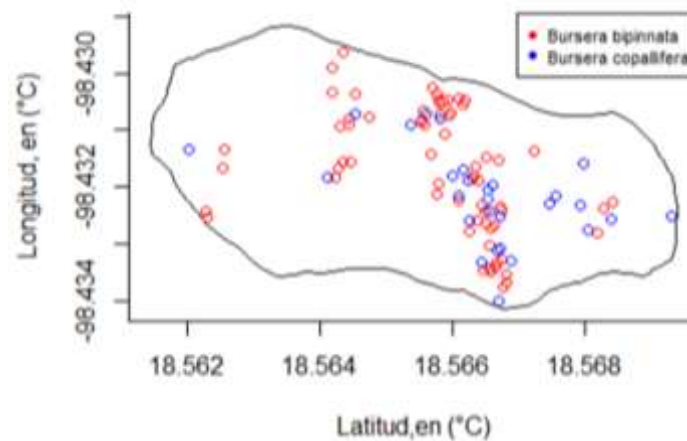
***Diámetro de ramas secundarias 1 y 2.*** El diámetro de las ramas secundarias son otra característica morfológica importante que se considera a la hora de determinar la cantidad de resina de copal (Zenteno-Ruiz, 2007; Abad-Fitz et al., 2020). Sus nemónicos en el modelo fueron “dia1” y “dia2”, respectivamente.

***Altura total del árbol.*** La altura total también puede influir en la producción de resina de copal. En otras especies donde se extrae resina como en los pinos se

utilizan caracteres dendrométricos como base fundamental (Reyes-Ramos et al., 2019). Su nemónico en el modelo fue “alt”.

#### 6.4.4 Base de datos y medición de variables

Para el levantamiento de los datos ecológicos de la vegetación en el área de estudio se realizó un muestreo aleatorio simple. La unidad de muestreo fue un cuadrante de 10 m<sup>2</sup> (Paredes et al., 2019). Por lo que, 3 097 unidades de muestreo (UM) se estimaron en las 30.8 ha del área de estudio. Se ubicaron 100 unidades de muestreo de copal en toda el área de estudio (**Figura 14**) donde se registraron sus coordenadas geográficas, se evaluó su condición actual y se midieron sus variables dasométricas altura total, diámetro del tallo y diámetro de dos ramas secundarias (Abad-Fitz et al., 2020; Reyes-Ramos et al., 2019).



**Figura 14.** Ubicación de los 100 árboles de copal en el área de estudio.

Las coordenadas geográficas para cada árbol se midieron con un dispositivo de posicionamiento global. La condición de cada árbol se evaluó con la ayuda de productores de copal experimentados, utilizando factores como el estado de la corteza del tronco, la estructura de ramificación, el daño por plagas, enfermedades y epífitas, y el porcentaje de cobertura de la copa; mientras que, la elongación de ramas se midió con una cinta diamétrica (**Tabla 4**). El diámetro

del fuste se midió por debajo de las ramas secundarias con una cinta diamétrica debido a la irregularidad de sus alturas. Sin embargo, en muchos casos, el diámetro coincidió con el diámetro a la altura del pecho a 1.30 m de la base del suelo. El diámetro de las ramas secundarias (diámetro de la rama 1 y diámetro de la rama 2) se midió con la cinta diamétrica, aunque algunos árboles tenían más de dos ramas secundarias solo se midieron dos que son las más utilizadas para la extracción de resina por los productores de copal. La altura total del árbol (altura) se midió desde el nivel del suelo hasta el ápice de su copa con un hipsómetro tipo Haga. La cantidad de resina producida por cada árbol (producción) se estimó a través de la experiencia de los copaleros quienes observaron la morfología y condición de los árboles en campo, para determinar si era buena, regular o mala (**Tabla 3**).

#### **6.4.5 Selección de variables**

La presencia de multicolinealidad en un modelo se produce cuando dos o más variables predictoras están estrechamente correlacionadas, lo que da lugar a una estimación menos precisa debido al efecto de una variable independiente sobre la variable dependiente, a diferencia de cuando las variables independientes no están correlacionadas (Dormann et al., 2013). Para estimar la multicolinealidad entre las variables explicativas del copal se utilizó el coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $r$ ), que mide la asociación entre variables (Schober y Schwarte, 2018) y el factor de inflación de varianza (VIF), que evalúa cuánto aumenta la varianza del coeficiente de regresión estimado cuando los predictores están correlacionados (Akinwande et al., 2015). La correlación lineal de Pearson y el VIF entre las variables predictoras se verificó utilizando el paquete corrplot (Taiyun y Simko, 2021) y usdm (Naimi et al., 2014) del lenguaje estadístico R (R. Core Team, 2016) que permitieron descartar las variables redundantes con el fin de evitar el efecto de multicolinealidad y maximizar la contribución de las variables en el modelo (Chatterjee y Hadi, 2006; Dormann et al., 2013). Variables con pares correlacionados -coeficiente

de correlación de Pearson-  $|r| > \sim 0.70$  (Booth et al., 1994) y con un VIF mayor que cuatro se eliminaron en el modelo porque representa una correlación significativa entre las mismas (Wu y Zhang, 2013).

#### 6.4.6 Árbol de decisiones

Se desarrolló y validó un modelo de bosques aleatorios de clasificación para explicar la producción de resina de copal en función de sus variables morfológicas y de condición, en el ejido San Juan Raboso, dentro de la microcuenca hidrográfica Agua Escondida.

**Bosque aleatorio, RF.** El RF es un algoritmo de aprendizaje automático supervisado no paramétrico de clasificación que utiliza árboles de decisión para identificar variables predictoras importantes en función de una parte (normalmente el 70 %) de los datos utilizados para entrenar el modelo y el resto para estimar el rendimiento del modelo (Breiman, 2001). Una variable predictora es importante en el modelo de clasificación si al omitirla de la lista de variables predictoras aumenta el error “out of bag” (OOB). Este modelo crea muchos árboles de clasificación, cada uno generado por muestras bootstrap para mejorar el rendimiento de predicción del modelo (Breiman et al., 1984). En los RF, cada división de un árbol se determina utilizando un subconjunto aleatorio de factores de entrada normalizado en cada nodo. El resultado del modelo es el resultado medio de todos los árboles (Cutler et al., 2007).

Para ejecutar el RF, el 70 % de los datos se utilizó para el entrenamiento del modelo y se definieron a priori el número de árboles del bosque (ntree) y número de variables muestreadas aleatoriamente como candidatas para cada división (mtry). Estos parámetros se optimizaron para minimizar el error de generalización de los modelos (OOB) con el fin de obtener el mejor poder predictivo en la estimación. La idea principal del algoritmo es combinar muchos árboles de decisión utilizando una serie de datos de inicio y elegir variables explicativas (**Tabla 2**) en cada nodo del árbol (Arpaci et al., 2014). El 30 %

restante de los datos se utilizó para la validación del modelo que es el componente más esencial del proceso de modelización para asegurarse de que los resultados son científicamente relevantes (Jaafari, 2017). La predicción de los modelos se realizó a través del paquete random Forest (Liaw y Wiener, 2002) en el software R (R. Core Team, 2016).

***Evaluación de la precisión.*** El rendimiento de cada modelo se estimó con el método OOB que muestra el error de la predicción con base en las observaciones del conjunto de datos de entrenamiento que quedan fuera durante el proceso de construcción de cada árbol (Hastie et al., 2009). De manera conjunta, la precisión de las predicciones se confirmó con el conjunto de datos de validación a través de la matriz de confusión (Townsend, 1971) y el índice de concordancia Kappa (Kuhn, 2008; McHugh, 2012.). La precisión global de la predicción es la tasa en la que el modelo predice correctamente una clase determinada, o tipo de bosque en este caso. Se calcula tomando la suma del número total de predicciones correctas dividido por el número total de predicciones realizadas. La precisión Kappa, o el coeficiente de concordancia Kappa, es una métrica que da cuenta de la tasa de error esperada y se calcula restando la precisión esperada (E) de la precisión observada (O), y dividiéndola por 1 menos la precisión esperada  $\frac{(O-E)}{(1-E)}$ . El coeficiente Kappa mide la concordancia entre la clasificación y los valores reales. Fleiss et al. (2003) sugieren que, para la mayoría de los propósitos, valores de Kappa superiores a 0.75 indican un grado de concordancia excelente más allá del azar, valores inferiores a 0.40 un grado de concordancia pobre más allá del azar, y entre 0.40 y 0.75 un grado de concordancia bueno más allá del azar.

***Identificación de variables significativas.*** La importancia relativa de las variables se determinó a partir de la disminución media del coeficiente Gini (Mean Decrease Gini) y la disminución media de la precisión (Mean Decrease Accuracy) que es una de las métricas más utilizadas en los modelos de bosque

aleatorio (Schmidt et al., 2014). El primero mide el grado de homogeneidad entre los nodos y las hojas del árbol de clasificación, lo que significa que las variables con valores más altos son las más importantes para establecer categorías bien diferenciadas debido a la pureza de los nodos (mide la varianza total entre las clases de la variable de respuesta). La disminución media de la precisión mide la pérdida de precisión del random forest provocada por la eliminación de una determinada variable de la clasificación. Por lo tanto, las variables que muestran valores más altos son más importantes para la clasificación de los datos (Kuhn et al., 2008). Las dos medidas de importancia se calculan separadamente para cada árbol para luego promediarse sobre todo el random forest (Liaw y Wiener, 2002; Kuhn et al., 2008; Rodríguez-Galiano et al., 2012).

**Diagrama de dependencia parcial (PDP).** El gráfico de dependencia parcial (PDP o gráfico de PD) muestra el efecto marginal que una o dos características tienen sobre el resultado previsto de un modelo de aprendizaje automático (Friedman, 2001). Un gráfico de dependencia parcial puede mostrar si la relación entre el objetivo y una característica es lineal, monótona o más compleja.

## **6.5 Resultados**

### **6.5.1 Base de datos y selección de variables**

En este estudio se examinaron un total de 100 árboles de copal y se registraron las coordenadas geográficas de cada uno, se analizó su estado actual y se midieron sus variables dasométricas: altura total, diámetro del tronco y diámetro de dos ramas secundarias. Como variables predictoras se consideraron cuatro variables continuas (diámetro de fuste, diámetro de rama secundaria 1, diámetro de rama secundaria 2 y altura del árbol) y una variable categórica (condición, **Tabla 4**). Se consideró como variable respuesta la producción con tres niveles (**Tabla 3**). De acuerdo con la correlación lineal,  $r$  y el VIF, la

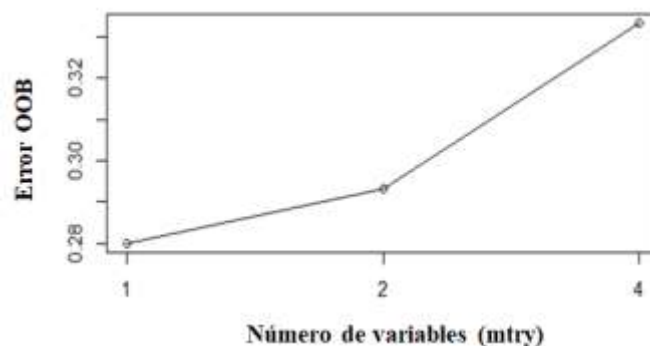
variable diámetro de rama secundaria 1 fue excluida del proceso de modelado posterior porque está altamente correlacionada.

### 6.5.2 Árboles de decisiones

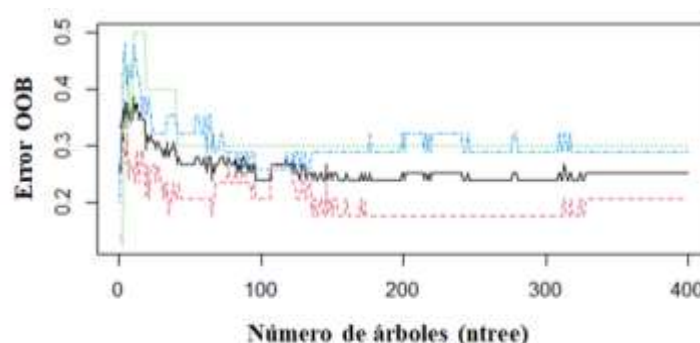
**Bosque aleatorio.** Los dos hiperparámetros clave, número de árboles (ntree) y número de variables probadas en cada división (mtry) fueron determinados por el método exhaustivo. Se utilizaron inicialmente 500 árboles (ntree) y dos variables a probar en cada nodo (mtry) que se determinaron utilizando la raíz cuadrada del número total de variables predictoras ( $\sqrt{4 \text{ variables}} = 2$ ). Los parámetros del modelo RF (mtry y ntree) se optimizaron con el fin de obtener el mejor poder predictivo en la estimación. La evaluación del rendimiento de los modelos se efectuó con el 70 % de los datos de campo ( $n = 70$ ). La estimación OOB de la tasa de error del modelo RF fue de 30.67 %.

A través del método exhaustivo, el número de variables (mtry) se asignó de uno a cuatro en el modelo de RF predeterminado con los otros parámetros fijos para obtener la tasa de error mínima. De acuerdo con el mismo método, ntree se llevó al algoritmo transversal nuevamente fijando el valor de mtry. Los resultados y los procesos se presentan en la **Figura 15** y la **Figura 16**.

Las combinaciones de parámetros se probaron con respecto a cinco niveles de ntree (50, 100, 400, 500 y 1000) y cuatro niveles de mtry (de uno a cuatro). El valor máximo de ntree probado fue de 1000 para mantener resultados estables (Breiman, 2001; Guo et al., 2016). El valor óptimo de los parámetros fue mtry = 1 y ntree = 400 (**Figura 16**), alcanzando una tasa de error del modelo RF del 28.05 %.



**Figura 15.** Relación entre mtry y la tasa de error OOB.



**Figura 16.** Relación entre ntree y la tasa de error OOB.

**Evaluación de la precisión.** El modelo elegido clasificó adecuadamente el 99 % las tres clases de producción de resina de los árboles de copal y alcanzó un índice Kappa de 98 % con los datos de entrenamiento, y 71 % y 47 % con los datos de validación, así como el OOB más bajo con 28 % con la menor cantidad de árboles de clasificación con 400.

En la **Tabla 5** se muestran las matrices de confusión del modelo final para el conjunto de entrenamiento y validación. De los datos de entrenamiento, el 97 %, el 100 % y el 97 % del número total de árboles con producción alta, media y baja de resina fueron clasificados correctamente; asimismo, que el 100 %, el 98 % y el 98 % de árboles con producción alta, media y baja de resina fueron clasificados correctamente. De los datos de validación, el 82 %, el 62 % y el 0

% del número total de árboles predichos con alta, media y baja producción de resina fueron clasificados adecuadamente por el modelo, mientras que el 71 %, el 75 % y el 96 % de árboles con producción alta, media y baja de resina fueron clasificados de manera correcta.

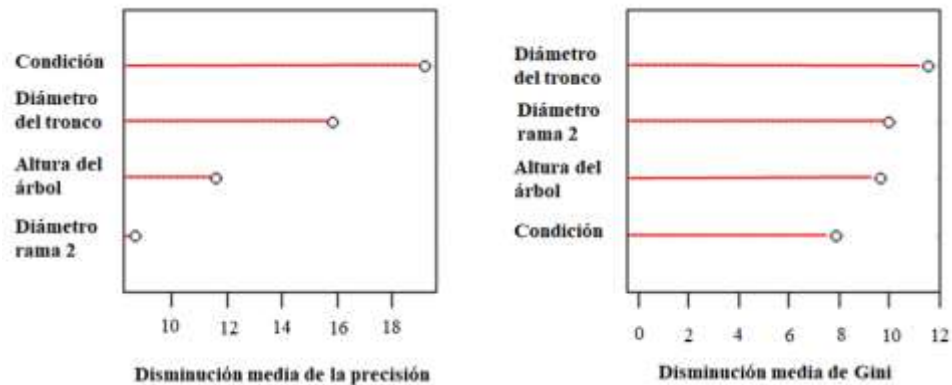
**Tabla 5.** Rendimiento y validación cruzada del modelo final.

| <b>Base de datos de<br/>entrenamiento</b> | <b>alta</b> | <b>baja</b> | <b>media</b> |
|-------------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>alta</b>                               | 34          | 0           | 1            |
| <b>baja</b>                               | 0           | 9           | 0            |
| <b>media</b>                              | 0           | 1           | 30           |
| <b>Base de datos de<br/>validación</b>    | <b>alta</b> | <b>baja</b> | <b>media</b> |
| <b>alta</b>                               | 9           | 0           | 2            |
| <b>baja</b>                               | 0           | 0           | 1            |
| <b>media</b>                              | 4           | 1           | 8            |

Nota: la matriz del conjunto de datos de validación se interpreta en sentido vertical.

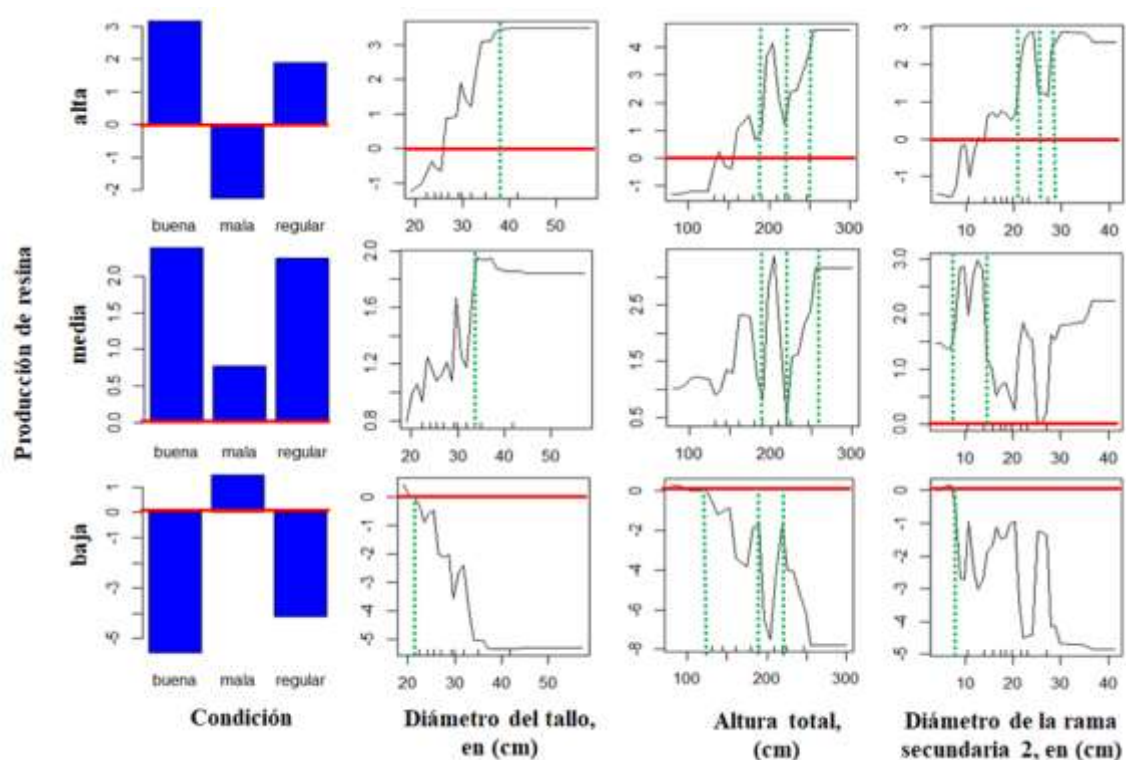
**Identificación de variables significativas.** La **Figura 17** muestra la contribución de las cuatro variables predictivas de mayor importancia según la disminución media de la precisión y la disminución media del coeficiente Gini, obtenidas de acuerdo con el principio de mínimo error OOB. De acuerdo con la disminución media de la precisión, la variable más importante dentro del modelo fue la condición (la selección de esta variable muestra el cambio más importante en la precisión del modelo), seguida del diámetro del árbol, la altura del árbol y el diámetro de la rama secundaria 2 que fue la variable menos importante. La disminución media de Gini (Mean Decrease Gini) indicó que el diámetro del tronco fue la variable con mayor homogeneidad de datos en la

clasificación, seguida del diámetro de la rama secundaria 2, de la altura del árbol y la condición.



**Figura 17.** Valor de la Disminución media de la precisión y disminución media de Gini de los cuatro descriptores más importantes del modelo final.

**Diagrama de dependencia parcial (PDP).** Utilizando el modelo de aprendizaje automático RF, se analizaron las dependencias parciales de la producción de resina en función de las variables morfológicas y de condición de los árboles del copal. En la **Figura 18** se puede observar que la condición de los árboles de copal fue el factor que determinó el rendimiento máximo de resina de copal con categoría "baja" mientras que el máximo rendimiento de resina de copal con categoría "media" se obtuvo cuando los árboles exhibían buenas y regulares condiciones, y la mayoría de las veces alcanzaron al menos 33 cm de diámetro del tallo, 2 y 2.50 m de altura total, y diámetros de ramas secundarias entre 8 y 15 cm. En el mismo gráfico se puede observar que la producción máxima de resina de copal con grado "alto" fue cuando el copal presentaba un buen estado y alcanzaba por lo general 38 cm de diámetro del fuste, 2 y 2.50 m de altura total y diámetros de ramas secundarias de 22 y 32 cm.



**Figura 18.** Gráfica de dependencia parcial para el modelo explicativo de producción de resina de copal con categoría “baja”, “media” y “alta” en función de la condición, diámetro del tallo, altura total y diámetro de la rama secundaria 2.

## 6.6 Discusión

### 6.6.1 Evaluación de la precisión

La precisión promedio de la predicción del modelo RF con los datos de entrenamiento (99 %) fue superior a la del modelo con los datos de validación (71 %); en otras palabras, la precisión general del modelo indicó que la clasificación de la producción de resina en los árboles de copal fue correcta en ambos modelos. En términos del índice Kappa, el modelo produjo una excelente clasificación de clases de producción de resina en árboles de copal usando datos de entrenamiento y una buena clasificación usando datos de validación (Fleiss et al., 2003).

### 6.6.2 Identificación de variables significativas

Dentro del modelo, una de las variables más importantes que influyen en los diferentes niveles de producción de resina fue la “condición”, la cual está definida principalmente por las características morfológicas del árbol, como la robustez y la salud (Linares y Bye, 2008; Abad-Fitz et al., 2020). En este estudio, entre los indicadores de la condición del árbol se consideró la cantidad de corteza presente en el tronco y las cavidades resiníferas; estos indicadores son afectados por la edad del árbol, misma que repercute en la disminución de la cantidad y diámetro de los conductos resiníferos y, por lo tanto, en la producción de resina (Giménez et al., 2005). Otro indicador que determinó la condición son los daños ocasionados por plagas y enfermedades que reducen la fotosíntesis y aumentan el estrés hídrico (Agrios, 2005), lo que conlleva a una disminución de la producción de resina y afecta la vida útil y calidad del árbol (Izquierdo-Bautista et al., 2011). Los copaleros muestran gran conocimiento para determinar la condición del árbol y seleccionar aquellos con posibilidades de extracción de la resina, dado que ellos observan las características de la corteza, ramificación, cobertura foliar e incluso aroma de las hojas, además de identificar los conductos resiníferos presentes mediante cortes previos (Abad-Fitz et al., 2020).

La segunda variable más importante fue el diámetro del tallo principal. Árboles con mayor diámetro de tallo principal tienen mayor área de aprovechamiento (Abad-Fitz et al., 2020), pero producen menor cantidad de resina. La resina se acumula principalmente en la peridermis, el floema secundario y la corteza, en esta última, solo si el tallo es joven. La acumulación de resina en la corteza disminuye a medida que el árbol crece, lo que se traduce en una disminución de las fuentes productoras de resina que puede reducir la producción en general (Franceschi et al., 2005). En especies de *Bursera* (*B. bipinnata*, *B. jorullensis* y *B. glabrifolia*), diámetros menores a 20 cm y mayores a 50 cm no son adecuados para ser aprovechados ya que producen poca resina. La explotación

de árboles con diámetros inferiores a 20 cm puede reducir su productividad futura (Purata y León, 2008; Cruz et al., 2006; Cruz-Cruz et al., 2017). En especies de *Pinus*, igualmente se reporta mayores producciones de resina en árboles que presentan mayores diámetros en comparación con diámetros más pequeños (Reyes-Ramos et al., 2019; Rodrigues et al., 2008). La tercera variable más importante fue la altura. Abad-Fitz et al. (2020) señalan que *Bursera bipinnata* produce poca resina en árboles de hasta 6 m de altura en comparación con otras especies de Burseraceae. En especies de *Pinus oocarpa*, la altura total del árbol no es un factor determinante en la producción de resina (Reyes-Ramos et al., 2019); sin embargo, ésta influye en la producción de látex de *Hevea brasiliensis* (Rojo et al., 2003) aunque la variable de mayor interés es el diámetro del tallo principal. Finalmente, la cuarta variable más importante fue el diámetro de ramas secundarias. Montúfar (2016) menciona que la extracción de resina se hace sobre las ramas más gruesas de los árboles. Reyes-Ramos et al. (2019) mencionan que en *Pinus oocarpa*, el diámetro de las ramas secundarias no es de interés, pero señalan que árboles con mayor número de ramas secundarias podrían ser los mejores productores de resina. En el aprovechamiento del incienso (*Clusia* vel. sp. nov.) tampoco se tiene referencia sobre la influencia del diámetro de las ramas secundarias en la producción de resina, pero si sobre la importancia de estas, principalmente en aquellas que se localizan más cerca del tronco (Zenteno-Ruiz, 2007).

### **6.6.3 Diagrama de dependencia parcial (PDP)**

La baja producción de resina en los árboles de copal fue determinada únicamente por su mala condición (Abad-Fitz et al., 2020). En el caso de producción de resina con categoría media, la condición buena y regular de los árboles también fue determinante, pero con un impacto positivo (Abad-Fitz et al., 2020). Como consecuencia del regular estado de los árboles, se observó una producción regular de resina en árboles que alcanzaron diámetros de fuste cercanos a los 33 cm y alturas totales de 2 m y 2.50 m. Esto significa que el

crecimiento de los árboles estuvo controlado por el diámetro y la altura de los mismos (Franceschi et al., 2005; Cruz-Cruz et al., 2017), ya que inicialmente éstos consumieron más energía y nutrientes, pero a medida que maduraron, las demandas disminuyeron, por lo que los árboles dispusieron de más energía y nutrientes para producir resina (Franceschi et al., 2005) para hacer frente a las diferentes perturbaciones bióticas y abióticas (Moreira, 2010). En las ramas secundarias con diámetros entre 8 y 15 cm, la producción media de resina también aumentó; sin embargo, no aumentó en otros diámetros de rama, porque la concentración de resina en el tallo principal fue mayor (Franceschi et al., 2005). El buen estado de los árboles también fue determinante en el caso de la producción de resina de categoría alta (Abad-Fitz et al., 2020). Debido al buen estado de los árboles, se observó una alta producción de resina en árboles con diámetros de tronco cercanos a los 38 cm y alturas totales de 2 y 2.50 metros. Diámetros y alturas que se encuentran dentro de los rangos óptimos para alcanzar la máxima producción de resina (Franceschi et al., 2005; Cruz-Cruz et al., 2017; Abad-Fitz et al., 2020; Reyes-Ramos et al., 2019; Rodrigues et al., 2008). La producción de resina con categoría alta también indicó una mayor tasa de producción cuando el diámetro de la rama secundaria fue mayor, específicamente 22 cm y 32 cm. Esta alta influencia también fue reportada por Montúfar (2016) quien afirmó que la extracción de copal se ve favorecida cuando se realiza en las ramas más gruesas de los árboles de copal.

## **6.7 Conclusiones**

De acuerdo con la construcción y la evaluación del modelo de RF, se construyó un nuevo método para explicar y predecir la producción de la resina de árboles de copal en función de sus variables de condición y morfológicas. El algoritmo de clasificación Random Forest obtuvo una buena precisión global y Kappa, tanto en datos de entrenamiento como de validación. La condición fue la variable determinante en los diferentes niveles de producción de resina de copal. La segunda variable de importancia fue el diámetro de tallo principal,

específicamente diámetros de 33 y 30 cm. La tercera variable que determina la producción de resina fue la altura, particularmente 2 y 2.5 m. Finalmente, la última variable de importancia fue el diámetro de las ramas secundarias que oscilan entre 8 y 15 cm, 22 cm y 32 cm.

## 6.8 Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de la presente investigación.

## 6.9 Literatura citada

- Abad-Fitz, I., Maldonado-Almanza, B., Aguilar, D. K. M., Sánchez, M. L., Gómez, C. L., Casas, A., Blancas, J., García-Rodríguez, Y. M., Beltrán-Rodríguez, L., Sierra-Huelsz, J. A., Cristianos, S., Moreno, C. A. I., Torres, G. I. y Espinosa-García, F. J. (2020). Consequences of Traditional Management in the Production and Quality of Copal Resin (*Bursera bipinnata* (Moc. & Sessé ex DC.) Engl.) in Mexico. *Forests*, 11(9), 1-24. <https://doi.org/10.3390/f11090991>
- Agrios, G. N. (2005). *Plant Pathology* (5<sup>a</sup> ed.). Academic Press. Amsterdam. 635 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02037-6>
- Akinwande, M. O., Dikko, H. G. y Samson, A. (2015). Variance Inflation Factor: As a Condition for the Inclusion of Suppressor Variable(s) in Regression Analysis. *Open Journal of Statistics*, 5(7), 754–767. <https://doi.org/10.4236/ojs.2015.57075>
- Anastacio-Martínez, N. D., Franco-Maass, S., Valtierra-Pacheco, E., y Nava-Bernal, G. (2016). Aprovechamiento de productos forestales no maderables en los bosques de montaña alta, centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 21-38.
- Archibald, S., Roy, D. P., Van Wilgen, B.W. y Scholes, R. J. (2009). What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology*, 15(1), 613–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x>
- Arpaci, A., Malowerschnig, B., Sass, O. y Vacik, H. (2014). Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. *Applied Geography*, 53, 258–270. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.05.015>
- Booth, G. D., Niccolucci, M. J. y Schuster, E. G. (1994). Identifying proxy sets in multiple linear regression: an aid to better coefficient interpretation.

Ogden, United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.

- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A. y Stone, C. J. (1984). *Classification and Regression Trees* (1ª ed.). Routledge. New York. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>
- Chatterjee, S. y Hadi, A. S. (2006). *Regression analysis by example* (4ª ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470055464>
- Cruz, L. A., Salazar, M. L., y Campos, O. M. (2006). Antecedentes y actualidad del aprovechamiento de copal en la sierra de Huautla, Morelos. *Revista de Geografía Agrícola*, (37), 97-115.
- Cruz-Cruz, M., Antonio-Gómez, V. M., Rodríguez-Ortíz, G., Vásquez-Barranco, I. G., Lagunes-Rivera, L. y Hernández-Santiago, E. (2017). Resina y aceites esenciales de tres especies de copal del sur de Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(1), 12-23.
- Cutler, D. R., Edwards Jr, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J. y Lawler, J. J. (2007). Random forests for classification in ecology. *Ecology*, 88(11), 2783–2792. <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., García M. J. R., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D. y Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Duda, R. O., Hart, P. E. y Stork, D. G. (2000). *Pattern Classification* (2ª ed.). John Wiley & Sons: New York, NY, USA.
- Fleiss, J. L., Levin, B. y Cho, P. M. (2003). *Statistical Methods for Rates and Proportion* (3ª ed.). Wiley series in probability and statistics.
- Franceschi, V. R., Krokene, P., Christiansen, E. y Krekling, T. (2005). Anatomical and chemical defenses of conifer bark against bark beetles and other pests. *New Phytologist*, 167, 353-376. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01436.x>
- Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 29(5), 1189–1232. <http://dx.doi.org/10.1214/aos/1013203451>
- Fuentes, A. F. (2009). Identidad taxonómica y aspectos sobre la historia natural y usos del “copal de los Yungas” en Bolivia. *Kempffiana*, 5(2), 3-19.

- Giménez, A. M., Moglia, J. G., Hernández, P. y Gerez, R. (2005). *Anatomía de la madera* (2<sup>a</sup> ed.). Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. 53 p.
- Guo, F., Wang, G., Su, Z., Liang, H., Wang, W., Lin, F., y Liu, A. (2016). What drives forest fire in Fujian, China? Evidence from logistic regression and Random Forests. *International Journal of Wildland Fire*, 25, 505–519. <http://dx.doi.org/10.1071/WF15121>
- Hastie, T., Tibshirani, R. y Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction* (2<sup>a</sup> ed.). Springer Series in Statistic: New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México [INEGI]. (2009a). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Ahuatlán, Puebla*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009b). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Epatlán, Puebla*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009c). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Izúcar de Matamoros, Puebla*. México.
- Izquierdo-Bautista, H., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., Velázquez-Martínez, A. y Córdoba-Ávalos, V. (2011). Problemática en los procesos de producción de las plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.) en Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 513-524.
- Jaafari, A., Gholami, D. M. y Zenner, E. K. (2017). A Bayesian modeling of wildfire probability in the Zagros Mountains, Iran. *Ecological Informatics*, 39(1), 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.03.003>
- Jiménez, G. A., Pincay, A. F. A., Ramos, R. M. P., Mero, J. O. F. y Cabrera, V. C. A. (2017). Utilización de productos forestales no madereros por pobladores que conviven en el bosque seco tropical. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 5(3), 270-286.
- Kuhn, M. (2008). Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- Kuhn, S., Egert, B., Neumann, S. y Steinbeck, C. (2008). Building blocks for automated elucidation of metabolites: Machine learning methods for NMR prediction. *BMC Bioinformatics*, 9(400), 1-19. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-9-400>

- Liaw, A. y Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. *R News*, 2 (3), 18-22.
- Linares, E. y Bye, R. (2008). El copal en México. *Biodiversitas*, (78), 8-11.
- May, T. (2016). Aspectos de sostenibilidad de productos no maderables forestales con uso curativo en el oeste de Pará, Brasil. *Ambiente y Desarrollo*, 20(38), 69-84. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd20-38.aspm>
- McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), 276-282. <https://doi.org/10.11613/BM.2012.031>.
- Montúfar, L. A. (2016). Copal de *Bursera bipinnata*. Una resina mesoamericana de uso ritual. *Travaux et Recherches dans les Amériques du Centre*, (70), 45-77.
- Moreira, T. X. (2010). *Variación genética y efecto de la disponibilidad de nutrientes en las defensas constitutivas e inducidas de Pinus pinaster Ait* [Tesis de doctorado, Universidad de Vigo]. <http://hdl.handle.net/10261/37055>
- Naimi, B., Hamm, N. A. S., Groen, T. A., Skidmore, A. K. y Toxopeus, A. G. (2014). Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling?. *Ecography*, 37(2), 191-203. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x>
- Oliveira, S., Oehler, F., San-Miguel-Ayanz, J., Camia, A. y Pereira, J. M. C. (2012). Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest. *Forest Ecology and Management*, 275(1), 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.003>
- Paredes, O. A., Razo, Z. R., Rodríguez, L. R., & Suárez, I. A. (2019). Diversidad de especies arbóreas y arbustivas del ejido El Puente, Mineral del Chico, Hidalgo. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 6(4), 93-105.
- Pennington, T. D. y Sarukhán, J. (2005). *Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies* (3ª ed.). Universidad Nacional Autónoma de México-Fondo de Cultura Económica.
- Purata, V. S. E. (2008). Capítulo 6. Bases para el buen manejo. En S. E. Purata Velarde (Ed.), *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites* (pp. 27-35). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) / Red de Aprendizaje, Intercambios y la Sistematización de Experiencias hacia la Sustentabilidad (RAISES).
- Purata, V. S. E. y León M. M. (2008). Capítulo 3. La colecta de resina. En S. E. Purata (Ed.), *Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites* (pp. 17-20). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la

Biodiversidad (CONABIO) / Red de Aprendizaje, Intercambios y la Sistematización de Experiencias hacia la Sustentabilidad (RAISES).

- R. Core Team. (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Reyes-Ramos, A., Cruz de León, J., Martínez-Palacios, A., Marc, L. P. C., Ambriz-Parra, E. y Sánchez-Vargas, N. M. (2019). Caracteres ecológicos y dendrométricos que influyen en la producción de resina en *Pinus oocarpa* de Michoacán, México. *Madera y Bosques*, 25(1), 1-13. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511414>
- Rodrigues, K. C. S., Azevedo, P. C. N., Sobreiro, L. E., Pelissari, P. y Fett-Neto, A. G. (2008). Oleoresin yield of *Pinus elliottii* plantations in a subtropical climate: Effect of tree diameter, wound shape and concentration of active adjuvants in resin stimulating paste. *Industrial Crops and Products*, 27(3), 322-327. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.11.010>
- Rodríguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M. y Rigol-Sanchez, J.P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
- Rojó, M. G. E., Jasso, M. J., Vargas, H. J., Velázquez, M. A. y Palma, L. D. J. (2003). Predicción de la producción de látex en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* müll.). *revista Fitotecnia Mexicana*, 26(3). 183-190.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1ª ed. digital). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Rzedowski, J. y Calderón de Rzedowski, G. (2013). Datos para la apreciación de la flora fanerogámica del bosque tropical caducifolio de México. *Acta Botánica Mexicana*, (102), 1-23. <https://doi.org/10.21829/abm102.2013.229>
- Schmidt, A., Niemeyer, J., Rottensteiner, F. y Soergel, U. (2014). Contextual Classification of Full Waveform Lidar Data in the Wadden Sea. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(9), 1614–1618. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2302317>
- Schober, P. y Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(1) 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Taiyun, W. y Simko, V. (2021). *Corrplot: Visualization of a Correlation Matrix*. <https://github.com/taiyun/corrplot>.

- Tapia-Tapia, E. C. y Reyes-Chilpa, R. (2008). Productos forestales no maderables en México: Aspectos económicos para el desarrollo sustentable. *Madera y bosques*, 14(3), 95-112. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1431208>
- Townsend, J. T. (1971). Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix. *Perception & Psychophysics*, 9(1), 40–50. <https://doi.org/10.3758/BF03213026>
- Webster, B. L. (1978). Guide to judging the condition of a shade tree. *Journal of arboriculture*, 4(11), 247-249.
- Wong, L. G. J., Thornber, K. y Baker, N. (2001). *Evaluación de los recursos de productos forestales no madereros. Experiencias y principios biomédicos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 124 p.
- Wu, W. y Zhang, L. (2013). Comparison of spatial and non-spatial logistic regression models for modeling the occurrence of cloud cover in north-eastern Puerto Rico. *Applied Geography*, 37, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.10.012>
- Zenteno-Ruiz, F. S. (2007). Referencias botánicas, ecológicas y económicas del aprovechamiento del incienso (*Clusia* vel. sp. nov., Clusiaceae) en bosques montanos del Parque Nacional Madidi, Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 42(2), 148-156.