



**Ciencia y  
Tecnología**

Secretaría de Ciencia, Humanidades,  
Tecnología e Innovación



**UNIVERSIDAD INTERCULTURAL  
INDÍGENA DE MICHOACÁN**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA PARA LA SOSTENIBILIDAD  
ENERGÉTICA**

**UNIDAD ACADÉMICA PÁTZCUARO**

**RECOLECCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE  
CONOS DE PINO (*Pinus spp.*), COMO PROPUESTA ENERGÉTICA  
COMUNITARIA. CASO DE ESTUDIO: SAN FRANCISCO  
PICHÁTARO, MICHOACÁN, MÉXICO.**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA PARA LA SOSTENIBILIDAD  
ENERGÉTICA**

**PRESENTA:**

**ING. SANTIAGO NICOLÁS MÁXIMO**

**DIRECTOR  
DR. MARIO MORALES MÁXIMO  
MISE-UIIM**

**CODIRECTOR  
DR. LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA  
MISE-UIIM**

**PÁTZCUARO, MICHOACÁN, ABRIL 2025**



**UNIVERSIDAD INTERCULTURAL  
INDÍGENA DE MICHOÁN**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA PARA LA SOSTENIBILIDAD  
ENERGÉTICA**

**UNIDAD ACADÉMICA PÁTZCUARO**

**RECOLECCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE CONOS DE  
PINO (*Pinus spp.*), COMO PROPUESTA ENERGÉTICA COMUNITARIA.  
CASO DE ESTUDIO: SAN FRANCISCO PICHÁTARO, MICHOACÁN,  
MÉXICO.**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA PARA LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA**

**PRESENTA:**

**ING. SANTIAGO NICOLÁS MÁXIMO**

**DIRECTOR**

**DR. MARIO MORALES MÁXIMO**

**CODIRECTOR**

**DR. LUIS BERNARDO LÓPEZ SOSA**

**MIEMBROS DEL COMITÉ ACADÉMICO**

**DR. JOSÉ GUADALUPE RUTIAGA QUIÑONES**

**FITECMA-UMSH**

**M. EN C. JUAN CARLOS CORRAL HUACUZ**

**M. EN C. ANGÉLICA AGUSTÍN DIEGO**

**MISE-UIIM**

**PÁTZCUARO, MICHOACÁN, ABRIL 2025**



Asunto: Aprobación de Integración de Comité Lector  
**REFERENCIA: UIIM/DIR.A/MCRO/001 /2025**  
Pátzcuaro, Michoacán a 25 de marzo 2025

**C. Santiago Nicolas Máximo**  
**Egresada de la Maestría en Ingeniería**  
**para la Sostenibilidad Energética**  
**PRESENTE.**

**At'n: Lic. Guillermina González Alonso**  
**Jefa del Departamento de Titulación,**  
**Becas y Servicio Social.**

Estimado **Santiago Nicolas Máximo**, egresado de la Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética con número de matrícula **MISE09004**; a través de este medio y en respuesta a su solicitud, me permito informarle mi aprobación a su propuesta para la Integración del Comité Lector, para la revisión de su trabajo de Titulación, bajo la modalidad de "**Tesis**", denominado: "*Recolección, caracterización y evaluación de conos de pino (Pinus spp.), como propuesta energética comunitaria. Caso de estudio: San Francisco Pichátaro, Michoacán México.*". El comité quedó integrado de la siguiente manera:

| COMITÉ ACADÉMICO | GRADO ACADÉMICO | NOMBRE COMPLETO                 | ADSCRIPCIÓN |
|------------------|-----------------|---------------------------------|-------------|
| Presidente       | Doctor          | Mario Morales Máximo            | UIIM        |
| Secretario       | Doctor          | Luis Bernardo López Sosa        | UIIM        |
| Vocal            | Doctor          | José Guadalupe Rutiaga Quiñones | UMSNH       |
| Suplente 1       | Maestro         | Juan Carlos Corral Huacuz       | UIIM        |
| Suplente 2       | Maestra         | Angélica Agustín Diego          | UIIM        |

Sirva el presente para continuar con los trámites correspondientes en el Departamento de Titulación, Becas y Servicio Social. Le extiendo mi felicitación en esta etapa con la que culmina su formación profesional en nuestra casa de estudios.

Sin otro en particular me permito enviar un cordial saludo.

**"Caminar en la sabiduría"**  
**"Mimíxequaru Xangarani"**

ATENTAMENTE

**Mtra. Mónica Criseida Rangel Oropeza**  
**Directora Académica**



**UIIM**





**ASUNTO:** Voto Aprobatorio del trabajo recepcional  
**Pátzcuaro Michoacán a 27 de marzo del 2025**

**Mtra. Mónica Criseida Rangel Oropeza**  
**Directora Académica**

**PRESENTE**

Por este conducto hago de su conocimiento que después de haber leído el trabajo de titulación denominado “Recolección, caracterización y evaluación de conos de pino (*Pinus* spp.), como propuesta energética comunitaria. caso de estudio: San Francisco Pichátaro, Michoacán, México.”, bajo la modalidad de “**Tesis**”, realizado por Santiago Nicolás Maximo de la Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética con número de matrícula MISE09004 y una vez que el egresado atendió las observaciones y correcciones sugeridas, considero que el trabajo cumple con los requisitos tanto metodológicos como teóricos para ser presentado en examen recepcional, por lo cual emito mi **Voto Aprobatorio**.

Lo anterior para que el egresado pueda continuar con los trámites administrativos correspondientes.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**Dr. Mario Morales Máximo**  
Docente de la MISE  
[mario.morales@uiim.edu.mx](mailto:mario.morales@uiim.edu.mx)



**UIIM**

Quinta Tzipecua, carretera Pátzcuaro-Erongaricuar Km 3,  
Col. Centro, C.P. 58010,  
Pátzcuaro, Michoacán

**ASUNTO: Voto Aprobatorio del trabajo recepcional**

**Pátzcuaro Michoacán, a 27 de marzo del 2025**

**A quien corresponda  
Dirección Académica**

**PRESENTE**

Por este conducto hago de su conocimiento que después de haber leído el trabajo de titulación denominado "Recolección, caracterización y evaluación de conos de pino (*Pinus* spp.), como propuesta energética comunitaria. caso de estudio: San Francisco Pichátaro, Michoacán, México.", bajo la modalidad de "Tesis", realizado por Santiago Nicolás Maximo de la Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética con número de matrícula MISE09004 y una vez que el egresado atendió las observaciones y correcciones sugeridas, considero que el trabajo cumple con los requisitos tanto metodológicos como teóricos para ser presentado en examen recepcional, por lo cual emito mi **Voto Aprobatorio**.

Lo anterior para que el egresado pueda continuar con los trámites administrativos correspondientes.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

  
**Dr. Luis Bernardo López Sosa**  
**Miembro del comité lector**

C.c.p. Jefa del Departamento de Titulación, Becas y Servicio Social



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

Francisco J. Mujica s/n, Col. Felicitas del Río. Edificio "D" Planta Alta, Ciudad  
Universitaria, Morelia, Michoacán. Tel. (443) 3 22 35 00 extensión 3056, 3057



Morelia, Michoacán, a 27 de marzo del 2025.

**ASUNTO: Voto Aprobatorio del trabajo recepcional**

**Mtra. Mónica Rangel Oropeza**  
**Directora Académica**

**PRESENTE**

Por este conducto hago de su conocimiento que después de haber leído el trabajo de titulación denominado "Recolección, caracterización y evaluación de conos de pino (*Pinus* spp.), como propuesta energética comunitaria. caso de estudio: San Francisco Pichátaro, Michoacán, México.", bajo la modalidad de "Tesis", realizado por Santiago Nicolás Maximo de la Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética con número de matrícula MISE09004 y una vez que el egresado atendió las observaciones y correcciones sugeridas, considero que el trabajo cumple con los requisitos tanto metodológicos como teóricos para ser presentado en examen recepcional, por lo cual emito mi **Voto Aprobatorio**.

Lo anterior para que el egresado pueda continuar con los trámites administrativos correspondientes.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones**  
**rutiaga@umich.mx**

C.c.p. Jefa del Departamento de Titulación, Becas y Servicio Social



Asunto: Voto aprobatorio

Pátzcuaro, Michoacán a 28 de marzo de 2025

**Mtra. Mónica Criseida Rangel Oropeza**  
**Directora Académica**

**PRESENTE**

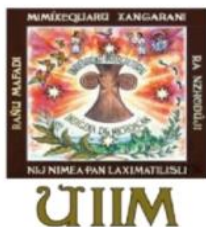
A través de este conducto en mi carácter de miembro del comité lector del Ing. Santiago Nicolas Maximo egresado de la Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética con número de matrícula MISE09004, informo que después de revisar el trabajo de titulación, denominado **“Recolección, caracterización y evaluación de conos de pino (*Pinus spp.*), como propuesta energética comunitaria. Caso de estudio: San Francisco Pichátaro, Michoacán, México.”**, que se presenta bajo la modalidad de “Tesis” y que este trabajo ha sido revisado por pares académicos, considero que se cumplen con los requisitos necesarios para validar dicha modalidad de titulación, por lo que emito mi **VOTO APROBATORIO**.

Atento a sus comentarios le envió un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

---

**M. en C. Juan Carlos Corral Huacuz**  
jcarlos.corralhuacuz@uim.edu.mx





**ASUNTO: Voto Aprobatorio del trabajo recepcional**  
**Pátzcuaro Michoacán a 28 de marzo del 2025**

**Mtra. Mónica Criseida Rangel Oropeza**  
**Directora Académica**

**PRESENTE**

Por este conducto hago de su conocimiento que después de haber leído el trabajo de titulación denominado "Recolección, caracterización y evaluación de conos de pino (*Pinus spp.*), como propuesta energética comunitaria. caso de estudio: San Francisco Pichátaro, Michoacán, México.", bajo la modalidad de "Tesis", realizado por Santiago Nicolás Maximo de la Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética con número de matrícula MISE09004 y una vez que el egresado atendió las observaciones y correcciones sugeridas, considero que el trabajo cumple con los requisitos tanto metodológicos como teóricos para ser presentado en examen recepcional, por lo cual emito mi **Voto Aprobatorio**.

Lo anterior para que el egresado pueda continuar con los trámites administrativos correspondientes.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Mtra. Angélica Agustín Diego

Docente de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

[angelica.agustin@uiim.edu.mx](mailto:angelica.agustin@uiim.edu.mx)



**UIIM**



**Asunto:** Autorización De  
Impresión  
**Referencia:**  
UIIM/DPPP/DTBSS/067/2025

Pátzcuaro, Michoacán a 01 de abril del 2025

**C. Santiago Nicolas Máximo**  
Egresado de La Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética

**P R E S E N T E:**

Por este conducto tengo a bien autorizar la impresión de su trabajo recepcional denominado "Recolección, Caracterización y evaluación de Conos de Pino (pinus spp) como Propuesta Energética comunitaria. Caso de Estudio: San Francisco Pichataro, Michoacán, México", bajo la modalidad de trabajo de investigación derivada en tesis, toda vez que ha cumplido con los requisitos metodológicos y administrativos.

Lo anterior con la finalidad de que procedan con los trámites de titulación correspondientes.

"Caminar en la sabiduría"  
"Mimíxequaru xangarani"

**ATENTAMENTE**

**LIC. GUILLERMINA GONZÁLEZ ALONSO**  
ENCARGADA DEL DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN,  
BECAS Y SERVICIO SOCIAL



**UIIM**



c.c.p. Archivo Interno

Quinta Tzipecua, carretera Pátzcuaro-Erongaricuaro Km 3,  
Col. Centro, C.P. 58010,  
Pátzcuaro, Michoacán

## AGRADECIMIENTOS

### *INSTITUCIONALES*

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la comunidad indígena de San Francisco Pichátaro. Se agradece el apoyo de los miembros del Barrio de San Bartolo Segundo por la disposición de brindarme la oportunidad de trabajar en su área boscosa. También se agradece a la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán (UIIM) por permitirme ser parte de la Maestría en Ingeniería para la Sostenibilidad Energética y poder llevar a cabo la realización del proyecto, sin dejar de lado el apoyo de los docentes que me impartieron cada una de las materias cursadas y que a lo largo de estos cuatro semestres estuvimos adquiriendo nuevos conocimientos.

A la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (FITECMA) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSH), por abrirme las puertas de su laboratorio en donde pude llevar a cabo prácticas referentes a la caracterización de mi proyecto.

### *A MIS DIRECTORES DE TESIS*

Al Dr. Mario Morales Máximo y el Dr. Luis Bernardo López Sosa, por el apoyo y acompañamiento en este trayecto, así como su paciencia y orientación en cada una de las etapas del proyecto. Gracias por permitirme involucrarme en experiencias profesionales más allá del aula de clases, en donde se ha logrado despertar en mi un interés mayúsculo sobre los proyectos de sostenibilidad energética, así como reconocer sus esfuerzos por buscar espacios en otras instituciones educativas y de investigación para que como tesista de ellos pudiera tener una perspectiva diferente de como se ha estado trabajando en proyectos de desarrollo tecnológico y que claramente has ayudado a mejorar los procesos de mi investigación.

### *A MI COMITÉ LECTOR*

M. EN C. Angélica Agustín Diego  
M. EN C. Juan Carlos Corral Huacuz  
Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones

Gracias por acompañarme en este trayecto al ser parte de mis revisores de tesis, que sin duda alguna fueron aportando acertadas correcciones en cada uno de los seminarios.

Al académico encargado del laboratorio de la FITECMA de la UMSH Luis Fernando Pintor Ibarra, que en coordinación con el Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones, que me hicieron sentir como en casa en el tiempo en que desarrolle mis prácticas y sobre todo por la paciencia y acompañamiento en cada una de las etapas de las mismas.

A la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán, Gracias por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría y seguir enriqueciendo mi vida profesional con su formación

¡!GRACIAS!!

## DEDICATORIAS

### *A MI HIJA*

Ainara Guadalupe Nicolas Correa, quien ha sido mi mayor motivación en este trayecto, pues basta con ver su sonrisa para darme cuenta que hay alguien a quien hacer sentir orgullosa, este logro es por ella y para ella, gracias por tu llegada a mi vida y darle un nuevo sentido, con ese amor sincero e incondicional que crece día tras día entre tú y yo.

### *A MI ESPOSA*

Alondra Janette Correa Sáenz, por su amor y su paciencia, pues ha sido un pilar fundamental en este logro, sin su apoyo incondicional no hubiese sido posible llegar hasta este punto, ya que siempre has estado ahí para apoyarme y aconsejarme, demostrándome que somos un equipo y que tenemos una motivación en común para seguir adelante, este logro también es tuyo, así que siento orgullosa de ti.

### *A MIS PADRES*

María Isabel Máximo Melgoza y Noel Nicolas Guzmán, por su invaluable apoyo incondicional en esta etapa de mi vida, sin demeritar que siempre han estado ahí para escucharme y aconsejarme en las decisiones que he tomado en mi vida, este logro es de ustedes ya que han inculcado en mi valores y principios que son de un valor sentimental muy grande; pero sobre todo gracias por seguir siendo unos excelentes padres.

### *A MIS HERMANOS*

Noel Adolfo, por su apoyo incondicional.

Ángel Eduardo, por ser más que un hermano, eres un amigo y confidente que siempre me has apoyado en los aspectos profesionales y personales de mi vida, este logro también es tuyo ya que sin tu incondicional apoyo hubiese resultado más difícil este proceso, es por ello que te estoy inmensamente agradecido.

### *A MIS TÍOS*

María Gloria Máximo Melgoza, por ser un referente dentro de mi vida profesional, marcando pautas para llevar a cabo un mejor trabajo y sobre todo gracias por ese apoyo incondicional con mi familia.

José Luis Máximo Melgoza, por todas esas críticas constructivas sobre mi formación y en mi vida personal, has logrado tener mi admiración al reconocer en ti la capacidad de salir adelante a pesar de las dificultades que la vida nos ponga.

¡Gracias a todas y todos!

## CONTENIDO GENERAL

|                           | Pág. |
|---------------------------|------|
| CONTENIDO DE FIGURAS..... | IV   |
| CONTENIDO DE TABLAS.....  | VI   |
| CONTENIDO DE ANEXOS.....  | VII  |
| NOMENCLATURA.....         | VIII |
| RESUMEN.....              | IX   |
| ABSTRACT.....             | X    |

### Capítulo I. Introducción general

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Introducción.....                | 1  |
| Antecedentes.....                | 4  |
| Planteamiento del problema ..... | 8  |
| Justificación.....               | 9  |
| Objetivo general .....           | 9  |
| Objetivos específicos .....      | 9  |
| Hipótesis.....                   | 10 |

### Capítulo II. Marco teórico

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 2.1. Sostenibilidad .....             | 11 |
| 2.1.1. Sostenibilidad ambiental.....  | 13 |
| 2.1.2. Sostenibilidad social .....    | 15 |
| 2.1.3. Sostenibilidad económica ..... | 16 |
| 2.2. Energías renovables .....        | 18 |
| 2.3. Biomasa .....                    | 20 |
| 2.4. Bioenergía.....                  | 22 |
| 2.4.1. Bioenergía forestal .....      | 23 |
| 2.5. Biocombustibles .....            | 24 |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.1. Biocombustibles líquidos.....                                       | 26 |
| 2.5.2. Biocombustibles gaseosos .....                                      | 27 |
| 2.5.3. Biocombustibles sólidos .....                                       | 29 |
| 2.5.4.1. Leña.....                                                         | 30 |
| 2.5.4.2. Briquetas.....                                                    | 31 |
| 2.5.4.3. Pellets .....                                                     | 32 |
| <b>Capítulo III. Materiales y métodos</b>                                  |    |
| 3.1. Diagrama metodológico .....                                           | 34 |
| 3.2. Descripción del área de estudio .....                                 | 35 |
| 3.2.1. Muestreo del área de estudio.....                                   | 36 |
| 3.2.2. Trituración y molienda.....                                         | 39 |
| 3.3. Caracterización Física de los conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.)..... | 40 |
| 3.3.1. Granulometría .....                                                 | 41 |
| 3.3.2. Contenido de humedad .....                                          | 41 |
| 3.3.3. Densidad aparente .....                                             | 43 |
| 3.3.4. Poder calorífico .....                                              | 43 |
| 3.4. Análisis proximal de los conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.).....      | 45 |
| 3.4.1. Contenido de cenizas .....                                          | 45 |
| 3.4.2. Material volátil.....                                               | 46 |
| 3.4.3. Carbono fijo .....                                                  | 47 |
| 3.5. Análisis químico de los conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.).....       | 47 |
| 3.5.1. Contenido de lignina, holocelulosa y extraíbles .....               | 48 |
| 3.5.2. Analisis elemental (CHONS).....                                     | 49 |
| 3.5.3. Microanálisis de cenizas .....                                      | 49 |
| 3.5.4. Espectroscopia FTIR.....                                            | 50 |

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 3.6. Estimación del potencial bioenergético..... | 51 |
| 3.7. Análisis multicriterio.....                 | 51 |

#### **Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados**

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1. Población y Muestra. ....                                       | 52        |
| 4.2. Análisis químico de los conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.)..... | 54        |
| 4.3. Contenido de humedad .....                                      | 55        |
| 4.4. Granulometria. ....                                             | 56        |
| 4.5. Densidad aparente.....                                          | 57        |
| 4.6. Poder calorífico.....                                           | 58        |
| 4.7. Contenido de cenizas. ....                                      | 59        |
| 4.8. Contenido de materia volátil .....                              | 60        |
| 4.9. Carbono fijo.....                                               | 61        |
| 4.10. Análisis elemental.....                                        | 62        |
| 4.11. Microanálisis de cenizas.....                                  | 63        |
| 4.12. Espectroscopia FTIR.....                                       | 64        |
| 4.13. Análisis multicriterio.....                                    | 66        |
| 4.13.1. Parámetros e indicadores.....                                | 66        |
| 4.13.2. Valores reales de los conos de pino.....                     | 67        |
| 4.13.3. Conos de pino y residuos de <i>Quercus</i> .....             | 67        |
| 4.13.4. Valores máximos y mínimos.....                               | 68        |
| 4.13.5. Normalización.....                                           | 68        |
| 4.13.6. Grafica radial.....                                          | 69        |
| 4.14. Potencial bioenergético.....                                   | 71        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>                                            | <b>72</b> |

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| <b>RECOMENDACIONES .....</b>            | <b>74</b> |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b> | <b>75</b> |

## **CONTENIDO DE FIGURAS**

|                                                                                          |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                                                                                          | <b>Pág.</b> |
| <br><b>Capítulo 2. Marco teórico</b>                                                     |             |
| Figura 2.1. Sostenibilidad.....                                                          | 11          |
| Figura 2.2. LGEEPA-Modalidades de ordenamiento ecológico.....                            | 14          |
| Figura 2.3. Vertientes del desarrollo sostenible.....                                    | 16          |
| Figura 2.4. Sustentabilidad económica.....                                               | 17          |
| Figura 2.5. Composición efectiva de producción de energía primaria de México (%) .....   | 19          |
| Figura 2.6. Representación de un ciclo sostenible para la transformación de biomasa..... | 21          |
| Figura 2.7. Procesos de conversión energética de biomasa seca forestal .....             | 23          |
| Figura 2.8. Métodos de obtención de energía a partir de residuos forestales .....        | 24          |
| Figura 2.9. Biocombustibles líquidos. ....                                               | 27          |
| Figura 2.10. Producción de biogás y biofertilizante.....                                 | 28          |
| Figura 2.11. Tipos de biocombustibles sólidos y su fuente de obtención .....             | 29          |
| Figura 2.12. Leña como fuente de energía.....                                            | 30          |
| Figura 2.13. Briquetas de madera.....                                                    | 31          |
| Figura 2.14. Pellets de madera.....                                                      | 32          |
| <br><b>Capítulo 3. Materiales y métodos</b>                                              |             |
| Figura 3.1. Diagrama metodológico.....                                                   | 34          |
| Figura 3.2. Ubicación geográfica de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México.....      | 35          |
| Figura 3.3. Selección de la muestra.....                                                 | 37          |

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.4. a) Bosque del Barrio de San Bartolo Segundo, b) conos de pino en el área de muestreo, c) delimitación del área de muestreo.....                                 | 38 |
| Figura 3.5. a) Molino de martillos anclado a un tractor Massey Ferguson, b) conos de pino triturado.....                                                                    | 39 |
| Figura 3.6. a) Conos de pino triturados, b) Tamizador RC-TAP RX-29, c) Tamices ASTM E-11 STANDAR (No 20, 40, 60). ....                                                      | 40 |
| Figura 3.7. a) Tamizador RC-TAP, b) Harina de conos de pino malla 40, c) Analizador de humedad AE Adam PMB 53.....                                                          | 42 |
| Figura 3.8. Determinación del peso de la muestra de los conos de pino.....                                                                                                  | 43 |
| Figura 3.9. Calorímetro.....                                                                                                                                                | 44 |
| Figura 3.10. a) colocación de la muestra en los crisoles, b) colocación de los crisoles dentro de la mufla a 550°C, d) Introducción de los crisoles dentro de la mufla..... | 45 |
| Figura 3.11. a) Peso anhidro de la muestra (1 g), b) Colocación de la muestra en los crisoles, c) Crisol con la muestra dentro de la mufla. ....                            | 46 |
| Figura 3.12. Equipo ANKOM-200 para el análisis de fibras.....                                                                                                               | 47 |
| Figura 3.13. Analizador elemental Costech International S.p.A., Milán, Italia. Modelo 4010.....                                                                             | 48 |
| Figura 3.14. espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) Varian (Modelo 730-ES).....                                                    | 49 |
| Figura 3.15. Espectrofotómetro ThermoFisher Scientific.....                                                                                                                 | 50 |

## **Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados**

|                                                                                                                         |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados</b> .....                                                             | V    |
| <b>NOMENCLATURA</b> .....                                                                                               | VIII |
| Figura 4.1. Muestreo de los conos de pino.....                                                                          | 52   |
| Figura 4.2. a) San Francisco Pichátaro, b) Bosque del Barrio de San Bartolo Segundo, c) Conos de pino (Pinus spp.)..... | 53   |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.3. Humedad inicial de las muestras de conos de pino.....                         | 55 |
| Figura 4.4. Porcentajes de granulometría de conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.).....       | 56 |
| Figura 4.5. Densidad aparente de los conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.).....              | 57 |
| Figura 4.6. Contenido de cenizas en las muestras de conos de pino (%).....                | 59 |
| Figura 4.7. Material volátil presente en los conos de pino.....                           | 60 |
| Figura 4.8. Grafica de espectroscopia FTIR de los conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.)..... | 65 |
| Figura 4.9. Análisis Multicriterio de los conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.).....         | 69 |

## CONTENIDO DE TABLAS

**Pág.**

### **Capítulo 2. Marco teórico**

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2.1. Sustentabilidad ambiental. ....                                         | 13 |
| Tabla 2.2. Producción de biomasa de cinco especies de leguminosas en Chiapas ..... | 20 |
| Tabla 2.3. Procesos de obtención de biocombustibles. ....                          | 24 |
| Tabla 2.4. Clasificación de los biocombustibles. ....                              | 26 |
| Tabla 2.5. Clases de pellet según norma UNE-EN ISO 17225-2.....                    | 33 |

### **Capítulo 3. Materiales y métodos**

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| Tabla 3.1. Numero de malla..... | 41 |
|---------------------------------|----|

### **Capítulo 4. Análisis y discusión de resultados**

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 4.1. Composición química de los conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.).....                     | 54 |
| Tabla 4.2. Poder calorífico de las muestras de conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.).....            | 58 |
| Tabla 4.3. Carbono fijo.....                                                                      | 61 |
| Tabla 4.4. Analisis elemental de las muestras de conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.).....          | 62 |
| Tabla 4.5. Microanálisis de cenizas de las muestras de conos de pino ( <i>Pinus</i> spp.) (ppm).. | 63 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 4.6. Parametrso e indicadores a evaluar.....                          | 66 |
| Tabla 4.7. Valor porcentual de indicadores (Conos de pinus spp.).....       | 67 |
| Tabla 4.8. Valores de indicadores de conos de Pinus spp. y Quercus spp..... | 67 |
| Tabla 4.9. Maximos y minimos.....                                           | 68 |
| Tabla 4.10. Valores normalizados.....                                       | 69 |

## **CONTENIDO DE ANEXOS**

|                                                                                                                  |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|                                                                                                                  | <b>Pág.</b> |
| Anexo 1-A. Datos del muestreó del área boscosa.....                                                              | 82          |
| Anexo 1-B. Evidencia del muestreó realizado en el bosque del barrio de San Bartolo Segundo.....                  | 83          |
| Anexo 2-A. Norma UNE-EN 18134-1:2016 para la determinación de humedad.....                                       | 84          |
| Anexo 2-B. Norma UNE-EN 17827-1:2024 para la determinación de la granulometría (distribución de partícula) ..... | 84          |
| Anexo 2-C. Norma UNE-EN 17828:2016 para la determinación de la densidad a granel...84                            |             |
| Anexo 2-D. Norma UNE-EN 18125:2018 para la determinación del poder calorífico.....                               | 85          |
| Anexo 2-E. Norma UNE-EN 18122:2023 para la determinación del contenido de ceniza...85                            |             |
| Anexo 2-F. Norma UNE-EN 18123:2024 para la determinación de materia volátil.....                                 | 85          |
| Anexo 2-G. Norma UNE-EN 16948:2015 para la determinación de análisis elemental (CHONS).....                      | 86          |
| Anexo 2-H. Norma UNE-EN 16948:2015 para la determinación de carbono fijo.....                                    | 86          |

## NOMENCLATURA

|                   |                                               |
|-------------------|-----------------------------------------------|
| <i><b>PE</b></i>  | Potencial energético [Tj/año]                 |
| <i><b>Mrs</b></i> | Masa de residuo seco [t/año]                  |
| <i><b>E</b></i>   | Energía del residuo por unidad de masa [Tj/t] |
| <i><b>PC</b></i>  | Poder Calorífico (MJ/Kg)                      |
| <i><b>CF</b></i>  | Carbono fijo (base seca)                      |
| <i><b>CZ</b></i>  | Contenido de cenizas (base seca)              |
| <i><b>MV</b></i>  | Material Volátil                              |

## Resumen

El presente trabajo de investigación se realizó de forma experimental y de campo, sobre el estudio y análisis de los Conos o semillas de *Pinus* spp. (piñas de pino) presentes en los bosques de la comunidad indígena de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México.

La investigación se desarrolló en una metodología establecida de cuatro etapas: la primera etapa de la investigación se centró en la evaluación y el diagnóstico del recurso forestal no maderable disponible en el entorno de la comunidad. La segunda etapa estuvo encaminada a la caracterización física de los Conos de *Pinus* spp., mediante el cual se determinó el contenido de humedad, así como el análisis de granulometría para determinar sus propiedades mecánicas de acuerdo a tamaños previstos del propio material. En la tercera etapa se realizaron los análisis proximales en donde se determinó el porcentaje de material volátil, cenizas y carbono fijo. En la cuarta y última etapa de la investigación se realizó en análisis químico del material que sin duda alguna fue de los más importantes, ya que mediante este se pudo obtener la información del contenido polimérico (lignina, celulosa y hemicelulosa), lo que determinó en gran medida las características esenciales para que el material cumpla con los requisitos de un biocombustible.

Los resultados más relevantes de la investigación muestran que la comunidad cuenta con un recurso forestal considerable, en donde se pudo encontrar que son aproximadamente un promedio de 28 conos de pino en un área de  $25m^2$ , lo que se traduciría en 11, 200 conos de pino por hectárea, lo que en términos generales representaría una recolección de conos de pino de 1, 171.29 toneladas/año aproximadamente.

Otros resultados importantes a destacar son el contenido de celulosa (36.88%), hemicelulosas (8.84%), lignina (40.27%), lo que indica que es un material con excelentes condiciones para ser aprovechado como biocombustible de tipo sólido. Aunado a ello, el poder calorífico del material se encontró en 20.76% y un 14.22 % de humedad. De manera general este material representa una alternativa como elemento principal para la creación de biocombustibles de tipo sólido que en consecuencia representaría una alternativa energética ambientalmente sostenible para los habitantes de la propia comunidad.

Palabras clave: *Pinus* spp., Biomasa, Potencial energético, Biocombustibles, Residuo no maderable.

## Abstract

The present research work was carried out experimentally and in the field, on the study and analysis of the cones or seeds of *Pinus* spp. (~~Pinus~~ pine cones) present in the forests of the indigenous community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico.

The research was developed in a four-stage methodology: the first stage of the research focused on the evaluation and diagnosis of the non-timber forest resource available in the community's environment. The second stage was aimed at the physical characterization of the *Pinus* spp. cones, through which the moisture content was determined, as well as the granulometry analysis to determine their mechanical properties according to the expected sizes of the material itself. In the third stage, proximate analysis was carried out to determine the percentage of volatile material, ash and fixed carbon. In the fourth and last stage of the research, the chemical analysis of the material was carried out, which was undoubtedly one of the most important, since it provided information on the polymeric content (lignin, cellulose and hemicellulose), which determined to a great extent the essential characteristics for the material to meet the requirements of a biofuel.

The most relevant results of the research show that the community has a considerable forest resource, where it was found that there is approximately an average of 28 pine cones in an area of  $25\text{m}^2$ , which would translate into 11, 200 pine cones per hectare, which in general terms would represent a generation of pine cones of approximately 1,171.29 tons/year. Other important results to highlight are the cellulose content (36.88%), hemicelluloses (8.84%), lignin (40.27%), which indicates that it is a material with excellent conditions to be used as solid biofuel. In addition, the calorific value of the material was found to be 20.76% and 14.22% moisture. In general terms, this material represents an alternative as the main element for the creation of solid biofuels, which in consequence would represent an environmentally sustainable energy alternative for the inhabitants of the community itself.

Key words: *Pinus* spp., Biomass, Energy potential, Biofuels, Non-timber residue.

# **Capítulo I**

## **Introducción general**

## Introducción

De manera general, las especies de pino existentes son originalmente endémicas del hemisferio Norte; en el continente americano se localizan en el norte de Canadá, hasta el sur de Nicaragua (Torres, 2015). En nuestro territorio nacional, las sierras madre oriental y occidental se concentra la mayor gran diversidad del género *Pinus* (Pinaceae) en el mundo, (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014).

El pino es la principal conífera de clima templado y frío en México, se distribuye en 24 estados de la república, de los cuales sobresalen dos en la región Centro Norte del país, uno en la Occidente, uno más en el sur y dos en la Golfo Centro (Semarnat, 2016).

La importancia económica de las masas forestales de pino en México se contabiliza por su aporte al país y su contribución al Producto Interno Bruto (PIB) forestal. En el contexto social, su relevancia se da por la población que habita en las zonas boscosas y que viven de los bienes y servicios que les proporcionan. Cabe señalar que 23 % de los habitantes del país (113.5 millones) moran en el sector rural (INEGI, 2016) y se estima que 5.3 millones de personas viven y dependen de los bosques (CONAPO, 2015).

Los ecosistemas forestales son fundamentales como un componente esencial de los sistemas biogeoquímicos del planeta, primordiales en el ciclo del agua, fijadores de nitrógeno, refugio natural de la flora y fauna y se les cataloga como una de las soluciones ante el cambio climático por su contribución a la mitigación de los efectos dañinos de dicho cambio (Cemda, 2018).

Investigadores del World Bank (Pagiola y Platais, 2002), señalan que los ecosistemas naturales proporcionan una gran variedad de servicios ambientales y citan como ejemplo a los distintos tipos de bosques, los cuales brindan servicios hidrológicos como la filtración de agua y la regulación de los flujos hídricos, y estos servicios rara vez son valorados hasta que los efectos de la deforestación son palpables como inundaciones o bien por la pérdida de agua o de su calidad.

De acuerdo a Moctezuma López et al., (2020), México tiene 138 millones de ha con vegetación forestal, las que equivalen a 70 % de la superficie del país; parte de esa área está cubierta por bosques y selvas en una cantidad de 64.9 millones de ha, de las cuales se calcula que 15 millones tienen potencial productivo para su aprovechamiento comercial, y se localizan, principalmente, en los macizos montañosos del oriente y poniente de la república. Sin embargo, la superficie en la que se realiza la extracción maderable es de 5.9 millones de ha.

La estimación del PIB primario forestal, la actividad que más contribuye al valor económico es el corte (tala) de árboles y dentro de las actividades secundarias (transformación), la escuadría y bajo este esquema es que se indagó, cuál es la derrama económica del género pino como troza (madera en rollo) (INEGI, 2016).

Por otro lado, (Picchio, 2020) señala que la biomasa forestal y agrícola son fuentes importantes de combustible renovable y sostenible para la producción de energía. Su creciente consumo está relacionado principalmente con el aumento de la demanda mundial de energía y los precios de los combustibles fósiles, pero también con la limitada disponibilidad de petróleo y el menor impacto ambiental de esta biomasa en comparación con otros combustibles no renovables. En particular, el sector del pellet ha experimentado importantes desarrollos tanto en términos de producción como de número de plantas de transformación instaladas. Además, la producción de pellets a partir de biomasa no leñosa está aumentando en importancia (Picchio, 2020). Uno de los aspectos fundamentales para el uso correcto y sostenible de un biocombustible es la evaluación de su calidad. Esto es aún más importante cuando se trata de la producción de pellets, teniendo en cuenta el amplio espectro de posibles materias primas para la peletización.

De cierta manera y de acuerdo a lo anteriormente citado, uno de los principales objetivos es alcanzar un bienestar social que brinde a toda la población la posibilidad de acceder a un buen nivel de vida y a las mismas oportunidades. El cambio climático derivado del incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera se conoce desde hace como 120 años, y desde hace 45 años (desde 1972) la ONU ha realizado conferencias internacionales sobre desarrollo sustentable y asuntos ambientales, en particular, sobre cambio climático, siendo las realizadas en Río de Janeiro las más importantes y conocidas (Salcido, 2017).

Fernández (1994) establece que el progresivo agotamiento de los combustibles fósiles convencionales sumado al aumento del consumo de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero ha demandado la búsqueda de fuentes de energía alternativas, renovables, sustentables, eficientes, rentables y con menores emisiones de gas de efecto invernadero, dichas alternativas permitirán evitar solo la utilización de leña como combustible en comunidades rurales, de tal manera que se permita tener un panorama de otras fuentes de biomasa para biocombustibles.

A partir de la biomasa se puede obtener una gran diversidad de productos; además de que se adapta perfectamente a todos los campos de utilización actual de los combustibles tradicionales. Así, mediante diversos procesos se puede obtener toda una serie de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden ser aplicados para cubrir las necesidades energéticas de confort, transporte, cocinado, industria y electricidad, o servir de materia prima para la industria (Fernández, 1994).

El objeto del presente estudio va enfocado al estudio y análisis sobre el aprovechamiento de los Conos *Pinus* spp., encontrados en distintas áreas de arboladas de Pino de la comunidad de San Francisco Pichátaro, como una fuente de energía renovable alternativa, en respuesta a la problemática sobre el uso de los combustibles fósiles.

## **Antecedentes**

A continuación, se presentan diversas investigaciones donde se abordan puntos importantes acerca de la sostenibilidad, vista desde un punto estratégico de aprovechamiento de la biomasa forestal, para la creación de nuevas fuentes de energía renovables o alternativas que coadyuven a innovación en cuanto a la utilización de los recursos forestales.

De acuerdo a lo establecido por Ríos (2013), la estimación del potencial de biomasa para el suministro de energía en México para hoy y las dos décadas venideras, se realizó mediante la aplicación de un enfoque novedoso para los recursos de biomasa relevantes teniendo en cuenta los aspectos técnicos y las limitaciones de sostenibilidad. Los resultados de este enfoque muestran que México tiene un potencial significativo de biomasa para la producción de energía (2,228 PJ/a en promedio), lo que representa aproximadamente el 48% del consumo total de energía final para 2010.

Con base en las perspectivas oficiales, se espera que, en las próximas dos décadas, este potencial podría aumentar ligeramente (2.453 PJ / a en 2030 en promedio), ya que el potencial de biogás de los residuos orgánicos de los municipios y el ganado (es decir, estiércol animal) podría aumentar debido al aumento en la producción de alimentos para la creciente población. Por otro lado, se espera que la tierra disponible para la producción de cultivos energéticos y la provisión de residuos de madera forestal disminuyan debido a la misma premisa (Ríos, 2013).

Por otro lado, Tyler Peterson (2018), realizó un aporte significativo en donde menciona que, los biocombustibles sólidos densificados derivados de biomasa, han experimentado un crecimiento fenomenal en la última década y se espera que crezcan durante las tres décadas de 2010 a 2040; puesto que la biomasa sólida representa la mayor parte de la biomasa utilizada para la generación de calor y electricidad, donde las fuentes principales de biomasa van desde desechos agrícolas, municipales y comerciales hasta desechos forestales y cultivos energéticos. Debido a la naturaleza variada de estas fuentes, las prácticas de recolección y el costo del transporte, se han desarrollado varios métodos para densificar la biomasa. La viabilidad a largo plazo y el crecimiento de los productos energéticos de base biológica dependen de la innovación técnica y de una mayor aceptación social de estos productos

Ramírez-Ramírez (2022), menciona que, en la actualidad se estima que la mitad de la población mundial depende de la biomasa para cocinar, con afectaciones en la salud y el cambio climático; por lo que se han propuesto llevar a cabo innovaciones en cocinas como una alternativa para reducir estos impactos, sin embargo, hasta la fecha existen pocos estudios detallados sobre los beneficios económicos de las intervenciones de cocinas mejoradas, incluidos los beneficios colaterales ambientales y de salud. En este trabajo se realizó una evaluación económica integral de un programa de difusión en zonas rurales de México, por lo que se presenta el análisis de costo-beneficio (CBA) resultante de la estufa mejorada Patsari, utilizando la estimación de los costos y beneficios directos, incluidos los ahorros de leña, la generación de ingresos, los impactos en la salud, la conservación del medio ambiente y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Eduardo García - Frapolli, 2010).

Estudios realizados por García-Frapolli (2010), muestran que las estufas Patsari representan una opción económica viable para mejorar las condiciones de vida de los habitantes más pobres del México rural, con relaciones beneficio/costo estimadas entre 11.4:1 y 9:1. Los mayores contribuyentes a los beneficios económicos provinieron del ahorro de leña y la reducción de los impactos en la salud, que constituyeron el 53% y el 28% del beneficio general, respectivamente

Por otro lado, Ramírez-Ramírez (2022) realizó una investigación sobre aserrín de madera derivado del procesamiento primario de la madera, que se ha utilizado para hacer briquetas sin algún adhesivo, llevando a cabo dicho análisis en una máquina de laboratorio de pistón hidráulico. De manera general, se encontraron diferencias significativas en los resultados obtenidos; encontrando que la densidad de las briquetas producidas fue superior a 1000 kg m<sup>3</sup>. Derivado de ello se observó que cuanto mayor era la densidad de las briquetas y menor era su expansión volumétrica, mayor era la fuerza de rotura y mayor era el índice de resistencia al impacto. Los valores de ceniza eran relativamente altos, y las briquetas no cumplían con los estándares internacionales de calidad, pero podían usarse localmente como fuente de energía térmica.

Tal como lo menciona Tauro (2018), debido a su potencial como fuentes de energías limpias, asequibles y renovables, particularmente cuando se producen a partir de residuos agrícolas y forestales, los pellets han recibido una atención especial a nivel internacional. Sin embargo, en la investigación se determinó que el conocimiento sobre la disponibilidad de materia prima, los costos y los usuarios potenciales de pellets de biomasa en México es muy escaso hasta el momento, además, en este documento se examinó el potencial de los pellets de biomasa para convertirse en una fuente de energía renovable baja en carbono que, podría competir y sustituir los combustibles fósiles en sectores económicos específicos en México (Tauro, 2018).

Estudios han revelado que, el potencial energético del mercado para pellets de residuos agrícolas y forestales actualmente disponibles en México se encuentra entre 131 y 233 PJ/año, con costos aproximados totales entre 6.3 y 12.8USD/GJ. Los pellets de aserrín tienen el costo más bajo y podrían competir con las astillas y el aserrín por distancias de suministro superiores a 400 km y 480km, dependiendo del costo de producción. A los precios actuales de los combustibles fósiles, los pellets de aserrín podrían competir con el GLP, el fueloil y el gas natural residencial. Los pellets pueden mitigar potencialmente hasta el 18% de las emisiones de GEI de la producción de electricidad en México (Tauro, 2018).

De igual manera Obi (2017) realizó un estudio, en donde evalúa el rendimiento energético de una estufa mejorada, comparándola con el rendimiento de una estufa de carbón y el fuego de tres piedras que utiliza dos combustibles de biomasa: cáscara de arroz y briquetas de aserrín. El rendimiento de las estufas se evalúa en función del protocolo de prueba estándar de prueba de ebullición de agua en tres fases: arranque en frío, arranque en caliente y cocción a fuego lento. Los resultados del estudio muestran que funcionó mejor en los arranques fríos y calientes en comparación con la fase de cocción a fuego lento. ANOVA muestra que la eficiencia térmica, la potencia de fuego, el consumo específico de combustible, el tiempo de ebullición, la velocidad de combustión y la relación de reducción de las tres estufas son significativamente diferentes entre sí para cada uno de los tipos de combustible.

Un análisis realizado por Rahaman (2017) sobre el efecto del tamaño de partícula, la presión y el diámetro del moho en las características físicas de las briquetas de paja de arroz permitió detectar y determinar sus propiedades físico-químicas. Las briquetas se prepararon utilizando un sistema de desinfección en frío de prensa de pistón operada manualmente y se analizaron en términos de densidad inicial, densidad estable, relación de densidad, relación de compactación, porcentaje de cambio de volumen, índice de rotura y consumo de energía. La reducción del diámetro del molde significativamente, mejoró el índice de rotura, aumentó el valor calorífico, y redujo el contenido de cenizas; deduciendo de esta manera que la energía consumida para la preparación de briquetas representó una disminución considerable de la energía que se almacenó en briquetas de paja de arroz para moho grande y pequeño, respectivamente.

Los escenarios para el futuro de la energía renovable hasta 2050 se revisan para explorar cuánta energía renovable se considera posible o deseable y para informar la formulación de políticas. Los objetivos políticos existentes para 2010 y 2020 también se revisan para su comparación. Los indicadores comunes son las cuotas de energía primaria, electricidad, calor y combustibles para el transporte a partir de energías renovables. Así, los escenarios globales, europeos y específicos de cada país muestran una participación del 10% al 50% de la energía primaria a partir de energías renovables para 2050. Para 2020, muchos objetivos y escenarios muestran una participación del 20% al 35% de la electricidad a partir de energías renovables, aumentando al rango del 50% al 80% para 2050 en los escenarios más altos. Los escenarios limitados por carbono para la estabilización de las emisiones o la concentración atmosférica representan compensaciones entre las energías renovables, la energía nuclear y la captura y almacenamiento de carbono (CCS) del carbón, la mayoría con alta eficiencia energética. Los resultados de los escenarios difieren según el grado de acción política futura, los precios del combustible, los precios del carbono, las reducciones de costos de la tecnología y la demanda agregada de energía, con limitaciones de recursos principalmente para la biomasa y los biocombustibles (Martinot, 2007).

## Planteamiento del problema

El poco desarrollo tecnológico en cuanto a la eficiencia energética de la biomasa, propone un escenario donde no existe una planificación sostenible para su aprovechamiento, lo que provoca la deforestación de grandes hectáreas de recursos forestales, ya que no se tiene un amplio conocimiento sobre alternativas sostenibles de fuentes de energía provenientes de la biomasa, y por ende se emplea la leña como único biocombustible. Esto conlleva a la pérdida de inmensas cantidades de bosque en el planeta, con la única intención de satisfacer ciertas necesidades humanas; no obstante, es necesario mencionar que el resultado de la combustión de la leña es el causante de enfermedades respiratorias en la población, con frecuencia se observan en familias que usan fogones abiertos y estufas de mal funcionamiento.

El cambio climático a nivel mundial, se deriva en gran medida de los efectos producidos por la huella de carbono a causa de la combustión que genera el uso de leña y otro tipo de fósiles, que contribuyen a la generación de gases de efecto invernadero (GEI).

Por lo cual, como lo establece Martínez-Bravo (2020) la aportación actual de la bioenergía en la matriz energética de México es de aproximadamente el 4.2% representada por leña y bagazo de caña; sin embargo, los sectores doméstico e industrial pueden aumentar su uso y llegar a ser ejemplos exitosos de mitigación de CO<sub>2</sub>, si se acompañan de tecnologías de transformación eficientes.

A nivel nacional, se cuenta con biomasa forestal suficiente para generar entre 1135 y 1923 PJ año<sup>-1</sup> en tareas térmicas, principalmente (mitigación de hasta 84.4 MtonCO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>). La mitigación acumulada del uso de leña asociada a tecnología eficiente y al gas LP puede alcanzar los 126.3 Mt CO<sub>2</sub>e al 2030 (Martínez-Bravo). Por ello, se requiere la implementación de nuevos sistemas energéticos renovables más amigables con el medio ambiente que, actualmente la comunidad de San Francisco Pichátaro cuenta con poco conocimiento acerca de ello, requiriendo una alternativa que conlleve la utilización de los conos derivados de los árboles *Pinus* spp., como propuesta energética renovable.

## **Justificación**

Actualmente no se cuenta con una gestión de la energía optima; por lo que la generación de un sistema de aprovechamiento energético derivado de la utilización de semillas o conos de *Pinus* spp., para usos energéticos residenciales y comunitarios o entorno local, lo cual se prevé un cambio en las formas de consumo local.

Además de que, el exceso en la acumulación de residuos forestales en las áreas arboladas, incluidos los conos de *Pinus* spp., hacen posible una alta probabilidad de que se generen con mayor frecuencia incendios forestales, causando un gran daño al habitat natural de la fauna habitante de estas reservas de árboles, así como también la eliminación de grandes hectáreas de pino, que bien podrían aprovecharse en forma de madera.

Una evaluación del potencial energético de los Conos de *Pinus* spp., para su aprovechamiento de forma local, pretende contribuir de manera favorable en el manejo de este recurso y en su disposición final considerando que los resultados encontrados están encaminados a generar propuestas eficaces de reducción del volumen de residuos que aporten a la consolidación de una base energética limpia en el contexto económico, social y ambiental.

## **Objetivo general**

Evaluar el potencial energético disponible en los Conos de pino (*Pinus* spp.) presentes en los bosques de la comunidad indígena de San Francisco Pichátaro, para determinar su pertinencia como biocombustible sólido en el sector local.

## **Objetivos específicos**

1. Evaluación y diagnóstico de la disponibilidad de conos de pino (*Pinus* spp.) en los bosques de la comunidad
2. Caracterización físico- química y análisis proximales de los conos de pino (*Pinus* spp.)
3. Evaluación mediante análisis multicriterio (MCA) la pertinencia del material como biocombustible de tipo sólido.

## **Hipótesis**

Analizando las propiedades físicas y químicas de los conos de pino (*Pinus* spp.), recolectados en los bosques de la comunidad indígena de San Francisco Pichátaro, estos podrían ofrecer un potencial bioenergético adecuado para la generación de energía térmica, ya que su poder calorífico de 20.76 MJ/Kg es ligeramente superior al de residuo de *Quercus* spp (19.5 MJ/Kg). De esta manera se podría establecer el uso de este material en tareas de índole doméstico dentro de la propia comunidad, creando con ello posibles escenarios para la generación de biocombustibles de fabricación local.

## **Capítulo II**

### **Marco teórico**

Estableciendo como eje principal de la investigación el análisis de las características de los conos de pino (*Pinus* spp.) para la creación de biocombustibles de tipo sólido, se realizará la indagación y el establecimiento de los conceptos y parámetros necesarios para la sustentación teórica de la investigación, teniendo en cuenta que la materia orgánica como lo son los conos de pino cuentan con múltiples propiedades; con lo cual se establecerá la pertinencia de utilizar esta materia orgánica como una fuente de energía renovable.

## 2.1. Sostenibilidad

En un principio, como fue definido en el informe Brundtland para la ONU en 1987, el desarrollo sostenible se centrará en tres pilares fundamentales e interrelacionados (Figura 2.1.): el ambiente, la sociedad y la economía, cuyo propósito es no alterar el equilibrio natural en términos ecológicos, la capacidad de resiliencia y adaptación de los sistemas naturales y la inequívoca necesidad de una explotación racional y consciente de la importancia de los recursos no renovables. Por lo tanto, se quiere evidenciar que la dimensión ambiental tiene y siempre ha tenido un carácter determinante, a pesar de omisiones intencionadas, o no, que puedan presentarse con respecto a esta dimensión (Uzcategui, 2023).

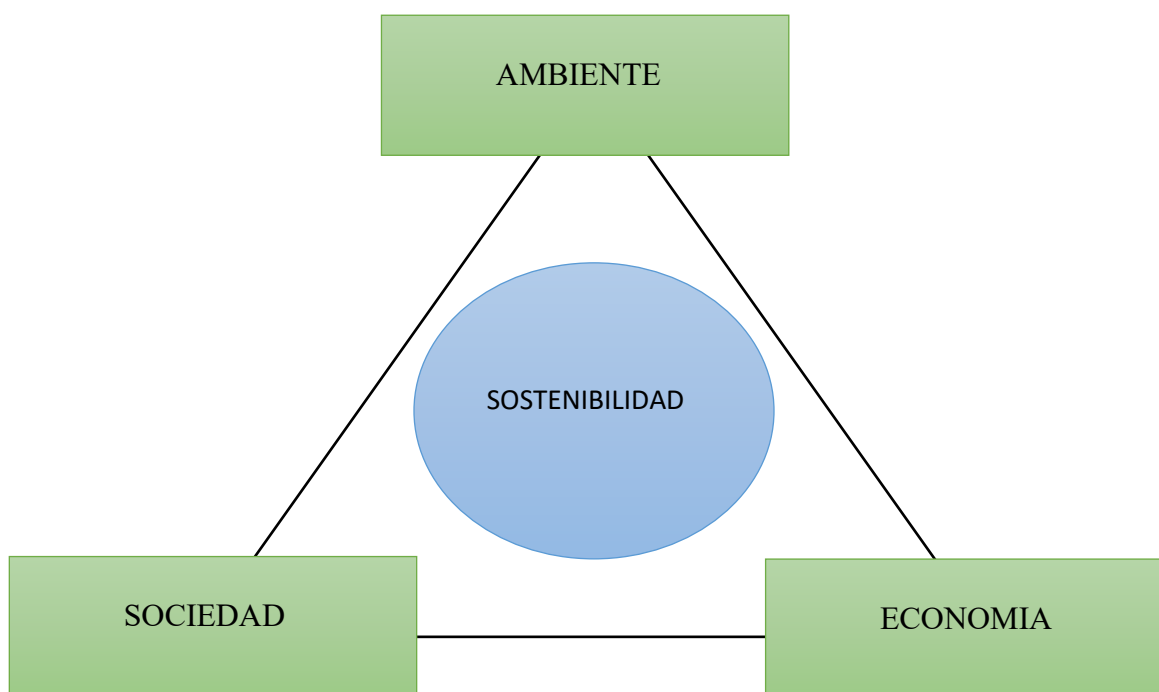


Figura 2.1. Sostenibilidad (Uzcategui,2023).

El desarrollo sostenible a lo largo de los últimos años ha logrado tener un gran impacto, no obstante, el éxito que este pueda o no llegar a tener será tarea de la sociedad en general, por medio de programas que verdaderamente sean sostenibles orientados hacia la interrelación de los procesos productivos y el manejo equilibrado de la biodiversidad que genera la naturaleza (F. P. Rodríguez & Flores, 2022)

Berger (2020) propone que el desarrollo sostenible tiene como principal objetivo analizar los constantes momentos de cambio en el medio ambiente, para en lo subsecuente llevar a cabo la propuesta de la creación de nuevos métodos de producción que sean verdaderamente adecuados ante los complejos escenarios de insostenibilidad que actualmente prevalecen en la sociedad; además de que se tiene que tomar en cuenta la construcción de condiciones sociales y comerciales que pongan por delante la intención de generar el menor impacto ambiental posible.

Dicho de otra manera, F. P. Rodríguez & Flores (2022) hacen referencia que, el desarrollo sostenible se constituye como una alternativa para mejorar la calidad de vida con el desarrollo de nuevos programas y recursos de alto impacto en la sociedad; dado que las consecuencias negativas de malas prácticas insostenibles sobre el medio ambiente es fundamental la promoción de la educación ambiental que permita según prevenir, mitigar y producir modelos efectivos de adaptación frente al cambio climático. En una concepción más generalizada, (Moreno et al., s/f) propone que la sustentabilidad ha significado un intento por conciliar sin mayor éxito el desarrollo económico con una serie de metas sociales como la reducción de la pobreza y con el equilibrio ecológico del planeta.

(Spadaro et al., 2017) expone que actualmente y desde varias décadas atrás, la sustentabilidad ha tratado de superponerse como un modelo de desarrollo dentro de la sociedad, haciendo una crítica comparativa y constructiva en relación con el pasado, el presente y el futuro próximo de nuestro planeta. Su constante aplicación se ha visto reflejada en ámbitos tan diversos como el medioambiente, la economía, lo social, entre muchos otros. De tal manera que, la sustentabilidad ha venido surgiendo como propuesta de un modelo de desarrollo más justo y equitativo dentro de la sociedad.

### 2.1.1. Sostenibilidad ambiental

México abordó la sustentabilidad ambiental en su Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 (PND 2007-2012) como la administración eficiente y racional de los recursos naturales para mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras, haciendo mención que uno de los principales retos es darle la relevancia que implica al medio ambiente como elemento esencial de la competitividad y el desarrollo económico y social para alcanzar un desarrollo sustentable, ya que aún está a tiempo de poner en práctica las medidas necesarias para que todos los proyectos, en específico los de infraestructura y los del sector productivo, sean compatibles con la protección del ambiente (tabla 2.1.) (Cervantes & Torres, 2022).

Tabla 2.1. Sustentabilidad ambiental.

| <b>Objetivo</b>                   | <b>Indicador</b>                                                                                            | <b>Unidad de medida</b>              | <b>Línea base</b>                                                                                                     | <b>Meta 2030</b>                                                                                                         |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Medio ambiente                    | Porcentaje de aguas residuales tratadas                                                                     | 0 a 100 %                            | 35 %                                                                                                                  | 100 %                                                                                                                    |
| Bosques y selvas                  | Hectáreas reforestadas                                                                                      | 0 a 100%                             | El balance entre la deforestación y la reforestación tiene un saldo negativo de 260 mil hectáreas de selvas y bosques | Llegar a un balance con saldo en equilibrio entre lo perdido y lo reforestado y continuar con un proceso de recuperación |
| Protección de las áreas naturales | Zonas decretadas y certificadas como áreas naturales protegidas como porcentaje de la extensión patrimonial | 0 a 100 % (Área en Km <sup>2</sup> ) | 11.5 % (224 mil Km <sup>2</sup> )                                                                                     | 16 % (390 mil Km <sup>2</sup> )                                                                                          |

Fuente: Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012.

De cierta manera, como lo aborda Cardoso Hernández et al., (2022) la crisis ambiental planetaria para el futuro es uno de los escenarios de mayor riesgo e incertidumbre para la humanidad, ya que, de no tomar medidas pertinentes en cuanto a la preservación de los recursos naturales actuales, podrían verse afectadas los escenarios de sostenibilidad ambiental en el futuro próximo.

En cuestiones prácticas, la evaluación de impacto ambiental (EIA), se torna obligatoria, previamente a la realización de obras y actividades consideradas en el artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual contempla cuatro modalidades de ordenamiento ecológico (Figura 2.2), lo cual no permite influir de manera radical en la toma de decisiones, debido a que su actuación se limita al último nivel en la planeación del desarrollo, requiriendo su fortalecimiento con la implementación de una herramienta de carácter estratégico que permita evaluar en materia ambiental los instrumentos de planeación de orden superior (Cervantes & Torres, 2022).

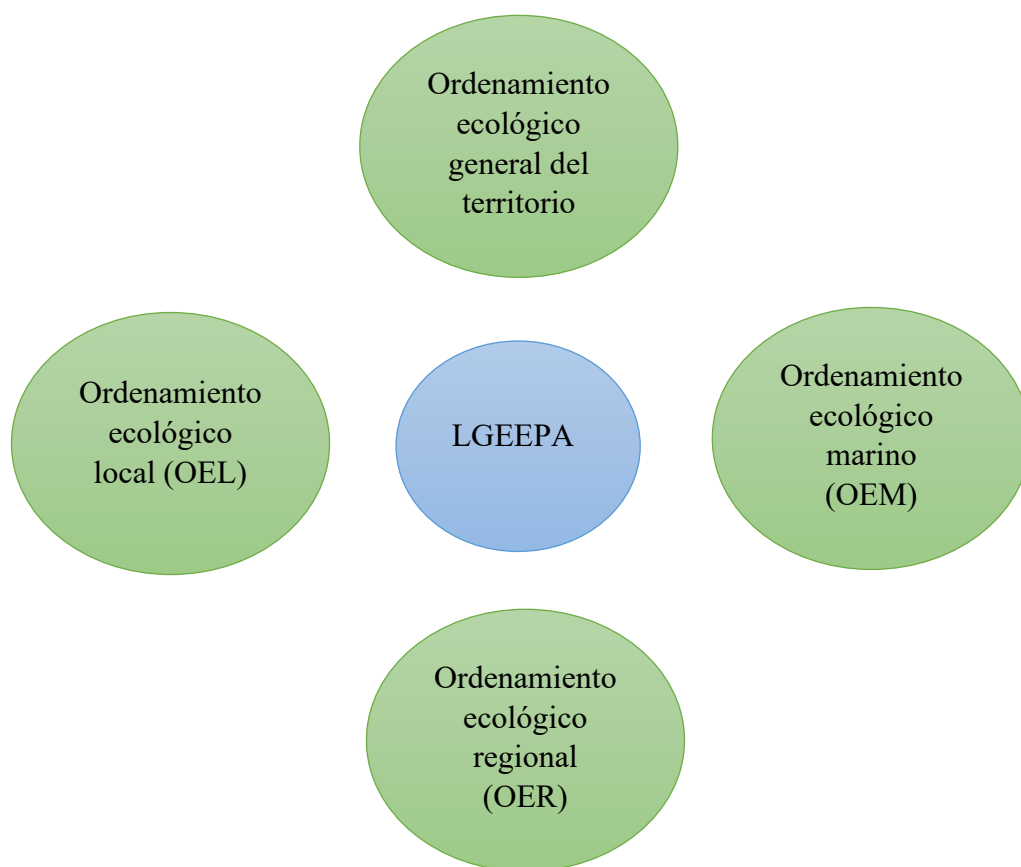


Figura 2.2. LGEEPA-Modalidades de ordenamiento ecológico (Cervantes & Torres, 2022).

De acuerdo a lo planteado por (Diamond, 2019) en las últimas décadas, los movimientos ecologistas y de resistencias a nivel local abonaron la visión de ver la naturaleza de una manera regenerativa, por lo que los procesos de sobreexplotación de los recursos empeoró cada vez más.

Dicho eso, resulta imprescindible el desarrollo de tecnologías alternativas con el único objetivo de alcanzar la armonía entre los seres humanos y el ambiente (Gibbons et al., 2018). Por tal motivo, (Waisman et al., 2019) menciona que es cada vez más común proponer como parte esencial del cambio el reconocer las causas del deterioro ambiental, para poder comenzar a establecer el desarrollo de tecnologías que no solamente no reduzcan los problemas socio-ambientales actuales, sino que puedan permitir una restauración de condiciones óptimas para el desarrollo de la vida vegetal, animal y humana, más allá de intentar mitigar los efectos del cambio climático, puesto que no basta con esto..

### **2.1.2. Sostenibilidad social**

De acuerdo a (Moreno et al., s/f), la sostenibilidad social se puede definir como la búsqueda de un equilibrio de crecimiento, donde sea primordial la equidad social, con la convicción de avanzar logrando que precisamente tal crecimiento como sociedad sea igualitario, es decir sin distinción de género, clase social, o algún otro tipo de obstáculo, puesto que todos los miembros de una sociedad tienen los mismos derechos; no obstante que este no comprometa el desarrollo dentro de la misma, a las generaciones futuras creando con ello una sociedad más equitativa y racional en la que todos y sin distinción alguna aspiren a un desarrollo realmente sustentable.

De tal manera que, I. Rodríguez & Govea, (2006) establecen tres vertientes del desarrollo sostenible (Figura 2.3) que deben sustentarse mediante valores éticos y conocimientos que deberán adquirirse para que con conciencia y compromiso se construyan sociedades sostenibles que utilicen los recursos adecuadamente y con pertinencia sean menos depredadores, usen procesos limpios, tengan una cultura de gestión política y empresarial comprometida y responsable con leyes sostenibles acordadas con la ciudadanía, para alcanzar la sostenibilidad social, económica y ambiental.

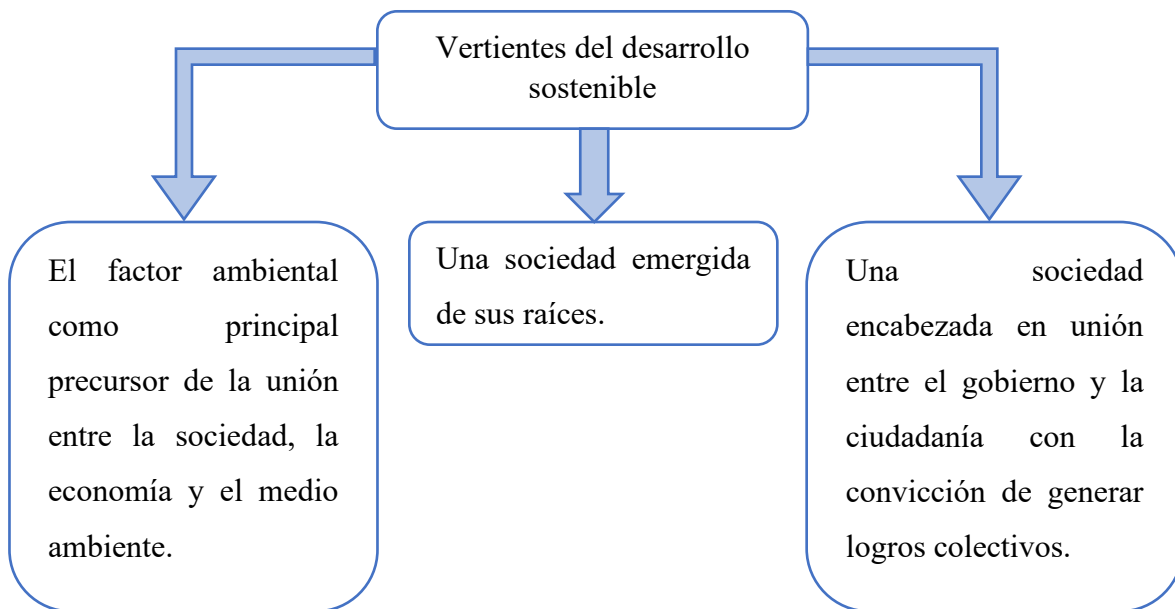


Figura 2.3. Vertientes del desarrollo sostenible (I. Rodríguez & Govea, 2006).

(Moran, s/f) plantea que dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU, que se encuentran estipulados en la agenda 2030, se toman en cuenta varios aspectos, entre los que se pueden mencionar el que se logre un al trabajo decente y con perspectivas de un crecimiento profesional y por ende económico, erradicando además las desigualdades existentes dentro de los espacios de trabajo.

### 2.1.3. Sostenibilidad económica

Es cierto que en la actualidad el principal de los retos que enfrenta la sociedad es la convivencia armónica con la naturaleza; no obstante, es imposible lograr comprender al ser humano totalmente independiente de los recursos que el medio ambiente le proporciona; su alimentación, y todos los insumos materiales que sostienen la producción de bienes y la misma vida, está soportada en los ecosistemas de la tierra, de ahí proviene la importancia de conservarlos (Haro-Martínez, 2014).

La sustentabilidad económica como lo menciona Gaudiano et al. (2015), es la capacidad que tiene una economía para mantener un determinado nivel de producción económica de forma indefinida; es decir que la sostenibilidad económica implicaría utilizar los diversos activos de una empresa u organización financiera de manera eficiente para que ésta pueda seguir funcionando a corto, mediano y más importante a largo plazo.

Mencionado lo anterior, se puede inferir que la sustentabilidad económica, implicaría además un análisis puntual sobre el valor actual y futuro de los recursos naturales, que a decir verdad es sobre lo que se sustenta todo esto. Entonces, se podría decir que, el ecosistema proporciona los recursos de producción que sustentan el crecimiento económico, como lo son los recursos naturales, trabajo y capital (que se genera a partir del trabajo y los recursos naturales), ver figura 2.4 (Gaudiano et al., 2015).

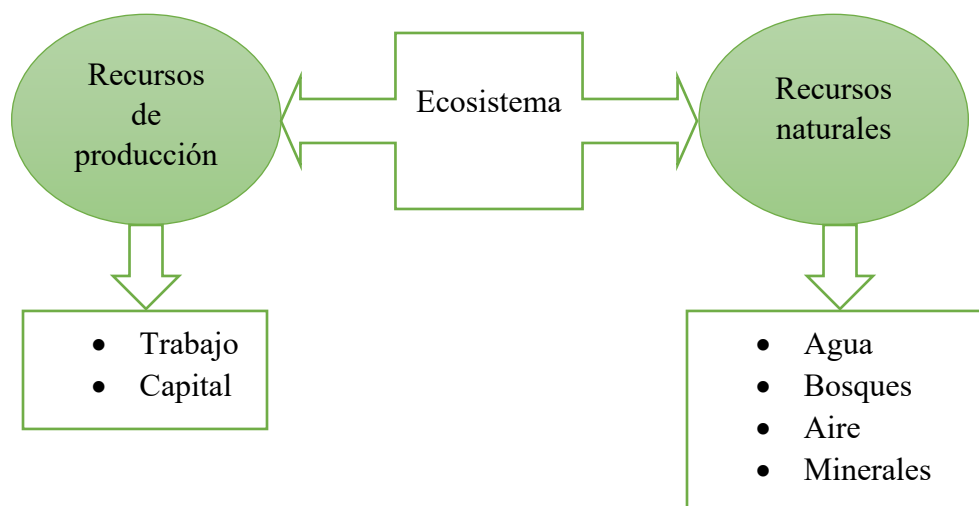


Figura 2.4. Sustentabilidad económica, (Gaudiano et al., 2015).

Por otra parte, como propone Taddei-Bringas (2014), los requerimientos de la población han ido un peldaño más allá de solamente satisfacer sus necesidades básicas, generando para ellos un estado de confort, y aún más en algunos casos la generación de recursos económicos satisfactorios va como principal objetivo. Lo anterior en complicidad con la mala gestión de los recursos naturales, ha provocado en consecuencia un desequilibrio eco-sistémico inminente, que por su puesto repercute en la mala calidad de vida de las personas.

De cierta manera, el crecimiento económico se volvió el objetivo primordial dentro de los sectores económicos de la sociedad, en donde el principal de los objetivos estaba encaminado a la generación y acumulación de grandes riquezas a costa del aprovechamiento de los recursos naturales disponibles a lo largo y ancho del planeta.

Hasta ese momento la satisfacción de necesidades primordiales paso a segundo plano; y por supuesto que todo ello trajo consigo un factor importante, la sobreexplotación de los recursos naturales, pues existían en abundancia y no se escatimaba en hacer uso de ellos, puesto que entre más se generaran, más riqueza económica habría. Fue entonces que se formuló un modelo de desarrollo económico productivista, cuya principal característica es la de generar un sistema económico en constante productividad (Costanza et al., 2014).

Desde esta perspectiva, la economía para su existencia, depende en gran medida de la conservación adecuada de los ecosistemas, desde donde se puede inferir la importancia de los procesos biológicos como prioridad sobre la rentabilidad propia de los ecosistemas; de tal manera que el realizar una valoración sistémica de la relación entre la naturaleza y los sistemas económicos resulta de gran relevancia para su correcto aprovechamiento, pues es necesario mencionar que solamente de esta manera se lograra obtener un resultado positivo en cuanto a la preservación de los recursos ambientales (Haro-Martínez, 2014).

## **2.2. Energías renovables**

Vázquez (2015) establece que la introducción de las energías renovables en la matriz energética, se ha logrado a través de la producción de electricidad, no obstante, en la actualidad el gas natural está cobrando relevancia debido a su bajo costo y a que es menos contaminante que otros hidrocarburos. En México su importancia ha incrementado: de 2002 a 2012 su participación pasó de 29 al 50% en la generación de energía eléctrica, lo que contrasta con la energía de fuente renovable, que presenta una tendencia a la baja, pues de 2010 a 2013 pasó de 18 a 13.7%.

En el análisis realizado por J. G. Rodríguez (2022) muestra que la producción real de energía primaria en México ascendió alrededor de los 8.854 peta julios; de los cuales solamente el 92.3% provenía de los combustibles fósiles, como los son el petróleo, 63.4%; gas natural, 23.6%; combustibles condensados, 1.9%; y carbón, 3.4%. El 7.7% restante procedía de fuentes alternativas: energía nuclear, 1.1%; energía hidráulica, 1.6%; energía geotérmica, solar fotovoltaica y eólica, 0.9%; biomasa, principalmente leña y biogás, 4.1%; y otros, 0.3% (Figura 2.5.).

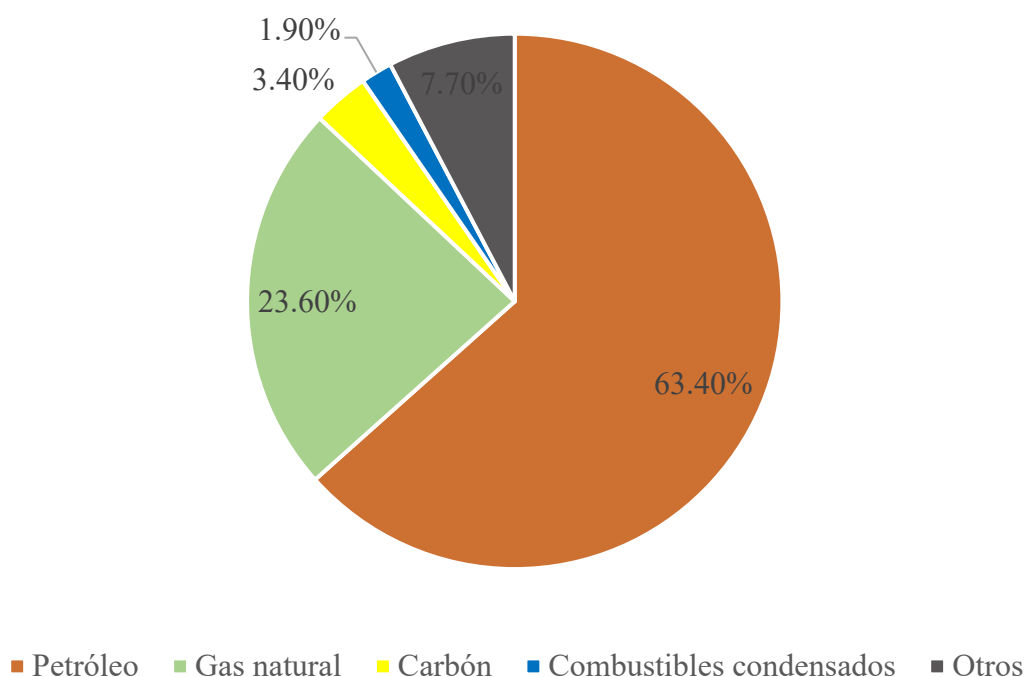


Figura 2.5 Composición efectiva de producción de energía primaria de México (%) (J. G. Rodríguez, 2022).

Como menciona Catalán Alonso (2021), México se encuentra comprometido con el cumplimiento de las metas de mitigación establecidas en la Ley de Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE) que señala que el sector eléctrico debe transformarse para que al 2024 un máximo de 65% de la electricidad provenga de combustibles fósiles. Para tales disposiciones, la Ley General de Cambio Climático que estipula que 35% de la generación eléctrica provenga de energías limpias para ese mismo año.

En las condiciones actuales de la matriz energética no se ven factibles de alcanzar estas metas, sobre todo, considerando que la participación de las energías renovables en la oferta de energía eléctrica se ha mantenido constante desde 2013 en prácticamente 20%. Es decir, para lograr los objetivos en materia de cambio climático sería necesario duplicar la oferta de energética proveniente de fuentes limpias, pasando de 51 292 GWh a 111 mil GWh (Catalán Alonso, 2021).

J. G. Rodríguez (2022) aborda que la energía proveniente de la biomasa tiene una capacidad instalada de 548 MW en operación, 40 MW son de biogás y el resto de biomasa de bagazo de caña de azúcar. En su trabajo estima una producción potencial de bioenergía entre 2635 y 3771 PJ/año en México, donde el 77.9% provendría de biomasa sólida como plantaciones de eucalipto, residuos agroindustriales y residuos de cultivos, el 20.1% de bioenergética líquida (de caña de azúcar y aceite de palma) y 2% de biogás (de residuos sólidos municipales y estiércol de ganado).

A decir verdad, México apenas comienza a recurrir a su gran potencial de energía renovable, ya que tan solo en el 2013 la capacidad total de energía renovable en el sector, fue de 14,2 GW del sistema total de 64 GW en capacidad; con esto, su participación estaba compuesta principalmente por energía hidroeléctrica (18% de la capacidad instalada total), seguido de viento y geotermia (con un total combinado de alrededor del 4%), no obstante falta llevar a cabo acciones determinantes para la incorporación de todas las demás fuentes de energía renovable a la matriz energética actual (SENER).

### 2.3. Biomasa

Martínez Romero & Leyva Galán (2014) determinaron que la biomasa se puede entender como el resultado de la transformación de la energía solar en energía química. En la actualidad la producción y conservación de la biomasa de cualquier cultivo cobra una importancia trascendente (Tabla 2.2); porque ello contribuye, además, a la protección medioambiental a través de la captura de carbono.

Tabla 2.2. Producción de biomasa de cinco especies de leguminosas en Chiapas

| Especies                                     | Peso fresco (ton.ha <sup>-1</sup> ) | Peso seco (ton.ha <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Frijol arroz ( <i>Vigna umbelata</i> )       | 25,0                                | 5,5                               |
| Chícharo gandul ( <i>Cajanus cajan</i> )     | 65,3                                | 17,1                              |
| Chipilin ( <i>Crotalaria</i> spp.)           | 39,7                                | 6,7                               |
| Frijol nescafé ( <i>Macuna deeringiana</i> ) | 36,2                                | 8,0                               |
| Centrosema ( <i>Centrocema pubescens</i> )   | 11,1                                | 2,4                               |

Fuente: (Martínez Romero & Leyva Galán, 2014).

Romero (2014) aborda el proceso de creación de biomasa desde que las plantas, como organismos autótrofos, tienen la capacidad de sintetizar su propia masa corporal o biomasa a partir de los elementos y compuestos inorgánicos del medio, en presencia de agua como vehículo de las reacciones y con la intervención de la luz solar como aporte energético para estas.

Tal y como lo menciona Chávez-Sifontes (2019) en el desarrollo de procesos para la producción de combustibles y/o productos químicos a partir de materias primas de origen renovable, la biomasa lignocelulósica (biomasa vegetal) se presenta como una de las más promisorias para disminuir la dependencia de los recursos fósiles, ya que es la única fuente en la tierra que contiene carbono e hidrogeno combinados, y a partir de ésta se puede obtener energía, combustibles y productos químicos (Figura 2.6).



Figura 2.6. Representación de un ciclo sostenible para la transformación biomasa lignocelulósica (Chávez-Sifontes, 2019)

(Gorozabel et al., 2022) aborda desde un punto de vista técnico que la biomasa lignocelulósica se considera una de las fuentes orgánicas renovables más abundantes que puede ser aprovechada de manera eficiente. Puesto que la composición puede variar dependiendo de la fuente donde se obtenga, destacan tres componentes esenciales celulosa (13-48%), hemicelulosa (14,8-60%) y lignina (8,2-30%).

Por otro lado, Bavera (2020) menciona que la relación carbono/nitrógeno es un valor numérico que determina la proporción de carbono/nitrógeno que podemos encontrar en un suelo. El carbono y el nitrógeno son dos elementos indispensables para el desarrollo de la vida ya que afectan directa o indirectamente a todos los procesos biológicos.

El carbono fijado por la biomasa proviene del CO<sub>2</sub> atmosférico, reducido durante el proceso de fotosíntesis por las plantas, y suele oscilar en torno a un 50-60 % de la materia orgánica, sin embargo, el porcentaje de nitrógeno es muchísimo menor que el porcentaje de carbono; debido a esto y a la competencia que ejercen los distintos seres vivos para la obtención del elemento, puede ser un factor limitante, en donde la relación carbono-nitrógeno se utiliza para medir la biomasa y la evolución de la materia orgánica en los estudios de fertilidad del suelo (Bavera, s/f).

## **2.4. Bioenergía**

En la actualidad, tal y como lo menciona Miyawaki et al. (2021) la biomasa y los residuos animales mantienen su importancia como combustibles tradicionales en comunidades rurales y urbanas, principalmente de los países en desarrollo, todos estos materiales orgánicos se revelan como combustibles alternativos de uso comercial e industrial, que producidos de manera sustentable pueden llegar a generar importantes cantidades de energía renovable.

El concepto de generación de energía renovable a partir de biomasa según Rahib et al. (2021) nace cuando se ven limitantes en cuanto al aprovechamiento de los recursos naturales, sobre todo, los que desde siempre se han usado como fuente principal para obtener energía: combustibles fósiles y carbón. Agregando al factor finito de estos recursos naturales, su uso desmedido, conlleva también a generar impactos negativos, como lo son, las emisiones de gases de efecto invernadero, que traen como consecuencia el calentamiento global.

### 2.4.1. Bioenergía forestal

La bioenergía como se ha mencionado por el autor Salinas et al. (2009) se deriva a partir de la biomasa, en este caso se establece como fuente principal la biomasa de tipo forestal, la cual incluye organismos y materia orgánica originada a través de procesos biológicos, por lo que se establece que la energía de dicha materia orgánica se encuentra almacenada mediante enlaces químicos representados mediante elementos como carbono (en mayor medida), hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre. No obstante, habría que recalcar que, durante la fotosíntesis se captura dióxido de carbono y vapor de agua que, con ayuda de la luz solar, se convierte en glucosa, la cual da origen a almidones, celulosa, hemicelulosa y lignina, entre otros.

La biomasa forestal tal y como la define Esteban, (2019) son productos forestales procedentes de cortas, podas, desbroces y otras actividades realizadas en masas forestales”, si bien el término se refiere normalmente a los productos que no tiene un uso en las industrias forestales de transformación (pasta de celulosa, tableros, aserrado, postes, etc.) sino un uso energético para la generación de calor y/o electricidad. Todas ellas se pueden obtener mediante diversos procesos como los que se mencionan en la figura 2.7.

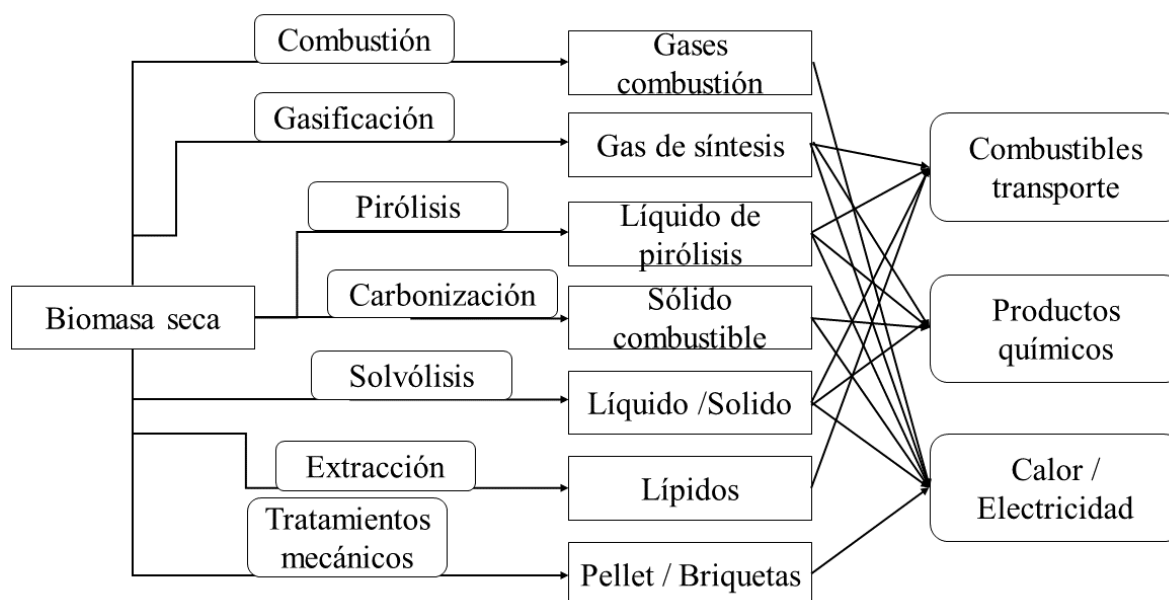


Figura 2.7. Procesos de conversión energética de biomasa seca forestal (Esteban, 2019).

Como lo plantea Salinas (2009) la energía de la biomasa puede ser obtenida en tres principales tipos de productos: energía eléctrica y calor, combustible para el sector de transporte y materia prima para la producción de químicos; esto mediante procesos de conversión de la biomasa, los cuales se clasifican generalmente en termoquímicos y bioquímicos (Figura 2.8).

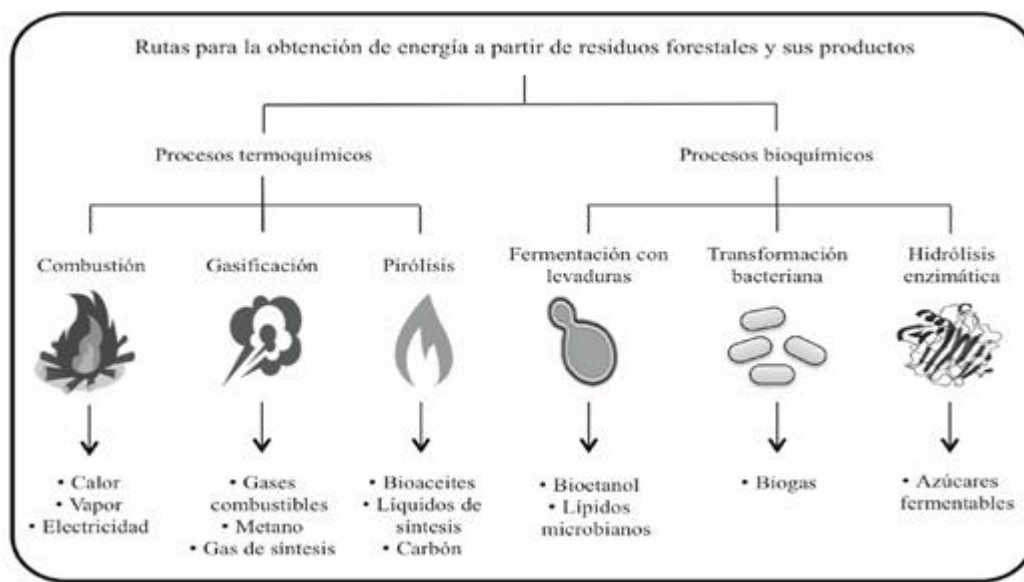


Figura 2.8 Métodos de obtención de energía a partir de residuos forestales (Salinas, 2009).

## 2.5. Biocombustibles

De acuerdo con Gasca (2009) los biocombustibles son aquellos tipos de combustibles que se obtienen de biomasa, que como ya se ha mencionado proviene de cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen en el proceso biológico de organismos vivos, tanto de origen vegetal como de origen animal. Según la naturaleza de la biomasa, su uso energético y el uso del biocombustible deseado, se puede contar con diferentes métodos para obtener biocombustibles (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Procesos de obtención de biocombustibles.

| Tipo de proceso | Técnicas     | Productos | Aplicaciones |
|-----------------|--------------|-----------|--------------|
| Mecánicos       | Astillado    | Leñas     | Calefacción  |
|                 | Trituración  | Astillas  | Electricidad |
|                 | Compactación | Briquetas |              |
|                 |              | Aserrín   |              |
| Termoquímicos   | Pirólisis    | Carbón    | Calefacción  |

|                  |                                      |                                     |                                                                |
|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                  | Gasificación                         | Aceites<br>Gasógeno                 | Electricidad<br>Transporte<br>Industria química                |
| Biotechnológicos | Fermentación<br>Digestión anaeróbica | Etanol<br>Biogás                    | Transporte<br>Industria química<br>Calefacción<br>Electricidad |
| Extractivos      | Extracción físico-<br>química        | Aceites<br>Esteres<br>Hidrocarburos | Transporte<br>Industria química                                |

Fuente: (Gasca, 2009)

Los biocombustibles por su parte, brindan mayor seguridad energética, y algo de los más destacable es que reducen en gran medida las emisiones de gases de efecto invernadero y de partículas que en comparación con los combustibles fósiles son muy benéficos, además que en consecuencia reducen la demanda de petróleo (Carrasco, 2022). Sin embargo, habría que tomar en cuenta que, por los procesos de obtención de los biocombustibles, se podrían generar posibles afectaciones, no obstante, es necesario llevar a cabo un balance entre los beneficios y perjuicios.

A continuación, se mencionan algunas de las características más importantes de los biocombustibles (Penner et al., 2009):

- Son fuente imprescindible de energía renovable.
- Proviene de la biomasa (materia orgánica).
- Producen en menor cantidad gases efecto invernadero.
- Tienen la capacidad de hacer combustión igual a los combustibles fósiles.

Dentro de las ventajas que tienen los biocombustibles es que proporcionan una fuente de energía inagotable, que de cierta manera estarán contribuyendo a la preservación de los recursos naturales de manera tal que en consecuencia reducirán de manera notable la emisión de gases con efecto invernadero, cifrándose en un 12% el caso del etanol y el 41% el caso del biodiesel (Penner, 2009).

Por lo anteriormente mencionado, los biocombustibles se pueden catalogar como un tipo de energía renovable en la medida en que el ciclo de plantación y cosecha se podría repetir indefinidamente, teniendo en cuenta que no se agoten los suelos ni se contaminen los campos de cultivo. A demás el uso de estos se podría adaptar con mayor rapidez a la tecnología ya existente (Gasca, 2009).

Tabla 2.4. Clasificación de los biocombustibles.

| Bioenergéticos | Sólidos                               | Líquidos                                          | Gaseosos                |
|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------|
| 1ª generación  | Leña, carbón vegetal, bagazo, pellets | Bioetanol, biodiesel, licor negro                 | Biogás, gas de síntesis |
| 2ª generación  | Biochar, torrefactos, torpellets      | Etanol celulósico, syndiesel, aceite de pirolisis | Biometano               |
| 3ª generación  |                                       | Diésel de algas, etanol de algas                  | Biohidrógeno            |

Fuente: (García, 2016)

### 2.5.1. Biocombustibles líquidos

De acuerdo a Sebastián (2022), los biocombustibles líquidos son aquellos que presentan un alto poder calorífico y que pueden ser utilizados en sistemas térmicos como los motores alternativos de combustión interna, quemadores o turbinas; aunque por otro lado se podrían no se obtienen directamente de un ecosistema natural y tampoco son subproductos de actividades humanas, sino que es biomasa procesada, o transformada, a partir de fuentes primaria y/o secundaria

Por otro lado, Herguedas (2012) denomina a los biocombustibles líquidos solamente a los que se obtienen de la biomasa, estableciendo que como principales proveedores de este recurso son los campos agrícolas y forestales; además de que tales materiales han sufrido diversos procesos de transformación hasta lograr poseer propiedades similares a las de los combustibles tradicionales (combustibles fósiles). También se puede señalar que, estos biocombustibles, tal y como es el caso del bioetanol y biodiesel son obtenidos en mayor medida de cultivos como caña de azúcar o aceite vegetal; por lo que en la figura 2.9 se representan los principales biocombustibles de tipo líquido y además las fuentes de donde se logran obtener.

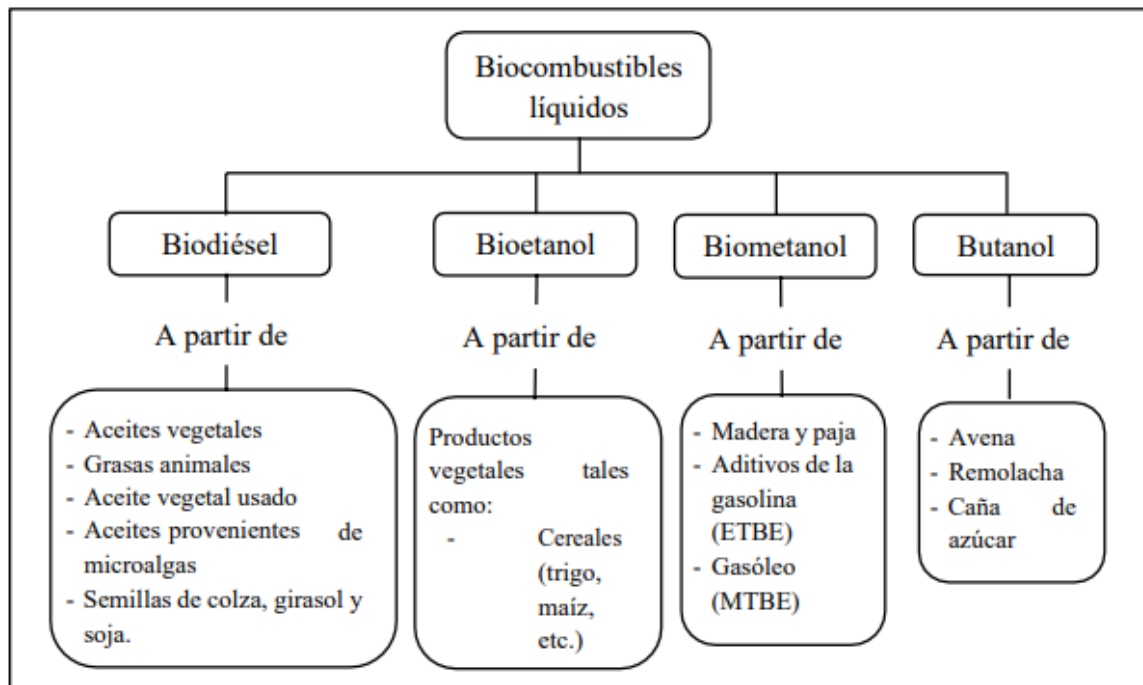


Figura 2.9 Biocombustibles líquidos (Herguedas, 2012).

Según este criterio (Castillo, 2022) propone que los biocombustibles solamente pueden crearse cuando la biomasa original presenta las siguientes características, de lo contrario su proceso de fabricación podría verse afectado por las inconsistencias en cuanto a las propiedades de los materiales en proceso:

- Están presentes un alto contenido en aceites, éstos se extraen por procesos físicos (prensado) o fisicoquímicos (extracción), para la producción de biodiesel.
- Existe un alto contenido de azúcares, para poder obtener bioetanol.
- La fuente de biomasa posee grandes porcentajes de lignocelulosa.

### 2.5.2. Biocombustibles gaseosos

Como se han venido mencionando los diferentes tipos de biocombustibles y sus propiedades, los de tipo gaseoso se pueden obtener por medio de diferentes métodos, en donde el principal o si no el que destaca más es el biogás, el cual se genera por las reacciones de biodegradación de residuos vegetales y animales como pueden ser estiércoles, aguas residuales o residuos agrícolas y de industrias agroalimentarias, mediante la acción de microorganismos y en condiciones anaeróbicas (Del Pino, 2008).

García-Galindo (2010) menciona que el biogás se produce en biodigestores, los cuales son sistemas que aprovechan las digestiones anaerobias de las bacterias que ya habitan en la materia prima, para transformar ésta en biogás y en fertilizante (Figura 2.10). El biogás puede ser utilizado como combustible en cocinas, iluminación y calefacción domésticas.

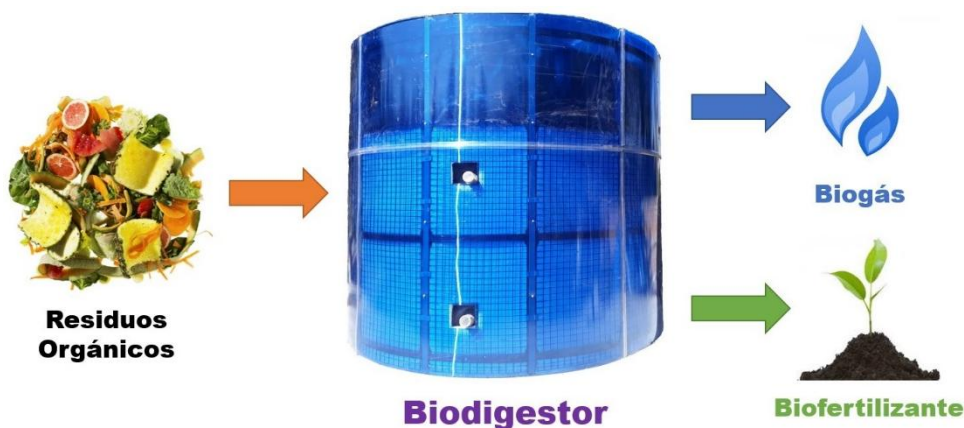


Figura 2.10. Producción de biogás y bio-fertilizante, (SDSM México).

De esta manera, Rivas (2010) propone que la alternativa de energía limpia para la actividad pecuaria es el biogás por medio de biodigestores, su generación por medio de desechos orgánicos proporciona energía de bajo costo, ingresos adicionales a los agricultores, oportunidades de empleo, energía descentralizada y protección al ambiente, reduciendo la huella de emisiones de gases de efecto invernadero.

Prieto (2012) describe que los biocombustibles gaseosos que se pueden generar a partir de la biomasa mediante diferentes procesos de conversión, como lo es la síntesis sin gas, la cual se produce al someter a la biomasa a altas temperaturas (entre 800 y 1.500°C) en ausencia de oxígeno; de lo cual se obtienen productos gaseosos que presentan poderes caloríficos bajos (4,2- 5 MJ/m<sup>3</sup>) compuestos por N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en proporciones variables.

El biohidrógeno como lo entiende Del Pino (2008) se obtiene a partir de biomasa mediante procesos biológicos como la fermentación y digestión anaeróbica. Este proceso posee un balance de CO<sub>2</sub> neutro, es decir, que la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento el mismo CO<sub>2</sub> que se libera durante la producción y posee un alto poder calorífico inferior (120 MJ/kg).

### 2.5.3. Biocombustibles solidos

Rodríguez (2016) establece que los biocombustibles sólidos están compuestos por materia orgánica de origen vegetal, animal o producido a partir de la misma mediante procesos físicos para ser utilizado en aplicaciones energéticas.

Existe también otras formas de uso con fin energético que requieren de algún tipo de acondicionamiento especial, como son las astillas, el serrín, el carbón vegetal, los pellets y las briquetas, los cuales se pueden quemar directamente o previa gasificación o pirólisis, para producir calor y electricidad. En la figura 2.11 se presentan los diferentes tipos de biocombustibles sólidos y sus materias primas.

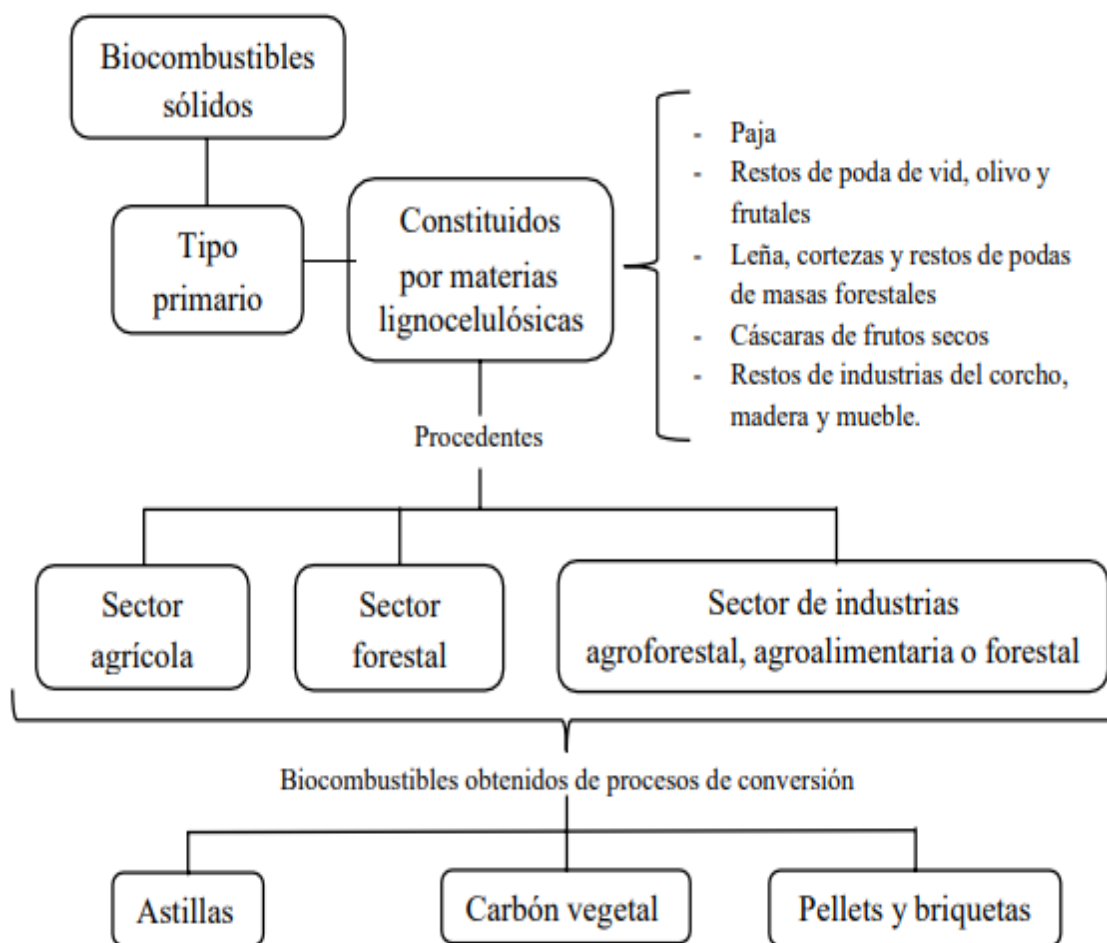


Figura 2.11 Tipos de biocombustibles sólidos y su fuente de obtención. (Rodríguez, 2016)

Los biocombustibles sólidos (BCS) según García (2016), se consideran fuentes de energía obtenidos de la biomasa, que pueden o no presentar mayormente estados de transformación física o química, que además se mantienen en estado sólido hasta su uso final, entre ellos se encuentran:

- La leña.
- Las astillas de madera.
- Los pellets de madera,
- Los pellets y briquetas de residuos forestales, agrícolas y otros.
- El carbón vegetal

Dicho sea, los biocombustibles sólidos se obtienen de diferentes fuentes, como lo son las primarias (las extracciones de ecosistemas naturales directamente orientadas a energía y los cultivos energéticos) y secundarias (residuos de las operaciones silvícolas, los restos generados en la actividad agrícola (podas o paja) y los residuos de industrias de procesamiento de la madera y/o agroalimentarias), estas fuentes en las que la materia orgánica se encuentra en estado sólido y de las que se puede obtener energía a través de procesos termoquímicos como: la pirólisis, la gasificación o la combustión (García-Galindo, 2010).

## **2.5.4 Tipos de biocombustibles sólidos**

### **2.5.4.1. Leña**

La leña ha sido el biocombustible más empleado por la humanidad a lo largo de la historia; su uso como fuente de energía para satisfacer necesidades de cocción y calefacción (Figura 2.12) es hoy una alternativa muy presente en nuestro país, ya que se trata de un recurso que puede obtenerse y procesarse localmente, con relativa facilidad y bajo costo, sobre todo en zonas rurales.



Figura 2.12. Leña como fuente de energía (FAO, 2008).

Este tipo de biocombustibles se encuentra constituido por madera trozada, proveniente de troncos o ramas. Es además un material altamente higroscópico, y al momento de su recolección (corte) puede tener un contenido de humedad elevado (mayor al 30-40%). La madera destinada a su utilización como leña normalmente atraviesa un periodo de estacionamiento que permite un oreado o secado al aire, hasta alcanzar un contenido de humedad en equilibrio con el ambiente circundante. (FAO, 2008).

#### **2.5.4.2. Briquetas**

De acuerdo a Fernández (2019) las briquetas son el resultado de una mezcla de diversas sustancias orgánicas que puede tener diferente geometría y tamaño; además que poseen una densidad elevada (entre 1.000 y 1.300 kg/m<sup>3</sup>) aproximadamente, y su proceso de elaboración se caracteriza por ser realizado por medio de prensas, en las que el material es sometido a altas presiones y se calienta, produciendo en su interior procesos termoquímicos que generan productos adherentes que favorecen la cohesión del material. También se pueden añadir adherentes artificiales para facilitar la cohesión de prensado. Es una forma normal de tratar el aserrín procedente de las industrias del mueble y la madera (Figura 2.13).



Figura 2.13. Briquetas de madera (Fernández, 2019).

Guzmán (2017) menciona que de las características principales de las briquetas se pueden destacar su alta densidad, no obstante, su forma puede ser cilíndrica o semejante. En si la base fundamental de las briquetas puede estar conformada de material forestal, biomasa residual industrial, biomasa residual urbana, carbón vegetal o simplemente una mezcla de todas ellas.

La fabricación de briquetas más empleadas es la que está hecha de aserrín, no llegan a emplear ningún tipo de aglomerante ya que la humedad y la propia lignina de la madera funcionan como adhesivo natural.

De cierta manera, las briquetas son una fuente de energía calorífica cambiabile, ya que son sistematizados como bioenergía sólida que tiene la utilidad biocombustible en diferentes actividades como en calderas, hornos, parrillas, cocinas, etc. Estos sobrantes de biomasa compactas son empleados en diferentes usos como cocinas, calefacción y uso industrial como cementeras, ladrilleras metalurgias, tostadores, secadores, y demás procesos que consumen grandes cantidades de madera (Guzmán, 2017).

#### **2.5.4.3. Pellets**

Las propiedades del pellet según Ayala (2021), hacen que este combustible sea considerado como sostenible, pues utiliza el concepto de economía circular, el cual consiste en crear un producto utilizando los desechos de la industria, de esta forma se reduce el impacto ambiental y aumenta las utilidades de la empresa. Se trata de un producto que se elabora normalmente en base a residuos (aserrín, ramas, astillas, etc.), con porcentajes de humedad bajos, una mayor eficiencia en la combustión y menos emisiones de CO<sub>2</sub> (Figura 2.14).

La creciente demanda del pellet enfrenta una reducción de la tradicional materia prima (desechos de madera), además de una industria platicadora muy dependiente de la industria forestal. Por lo anterior, se busca identificar y recomendar nuevas y mejores tecnologías de elaboración de pellets (Ayala, 2021).



Figura 2.14. Pellets de madera (Ayala, 2021).

A nivel internacional la clasificación de pellets se basa en lo establecido en la Norma UNE-EN ISO 17225-2 Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles, y Parte 2: Clases de Pellet de madera. La norma UNE-EN ISO 17225:2014 “Especificaciones y clases de combustibles” define las especificaciones que deben cumplir los combustibles de biomasa para ser clasificados. (UNE, 2014).

Tabla 2.5. Clases de pellet según norma UNE-EN ISO 17225-2.

| <b>Clases de pellet</b> | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A1                      | Pellet fabricado con la madera de tronco y residuos de la industria maderera no tratados químicamente                                                                                                               |
| A2                      | Pellet fabricado de árboles enteros sin raíces, madera del tronco residuos de tala, corteza, residuos y subproductos de la industria maderera no tratados químicamente                                              |
| A3                      | Pellet fabricado de origen forestal, plantaciones y otras maderas no usadas ni tratadas, residuos y subproductos de la industria maderera no tratados químicamente y de la madera reciclada no tratada químicamente |

Fuente: (UNE, 2014).

Ayala (2021) menciona que el pellet al ser un producto derivado de biomasa forestal puede experimentar variaciones durante su proceso productivo, manipulación, embalaje, almacenamiento y transporte. Las normas pueden establecer ciertos parámetros en que las diversas características físicas y químicas del pellet permiten asegurar su uso eficiente y en adecuadas condiciones, lo que se certifica u homologa a través de ensayos y muestreos en laboratorios debidamente adecuados y acreditados para ello. Todos los formatos en que se comercializa este producto deben especificar estas características y sus valores, de modo que el usuario final este informado de los parámetros que caracterizan el pellet que está consumiendo.

## **Capítulo III**

### **Materiales y métodos**

### 3.1. Diagrama metodológico

La metodología a seguir para la presente investigación se desarrollará a través de 4 fases, como se presenta en la figura 3.1.

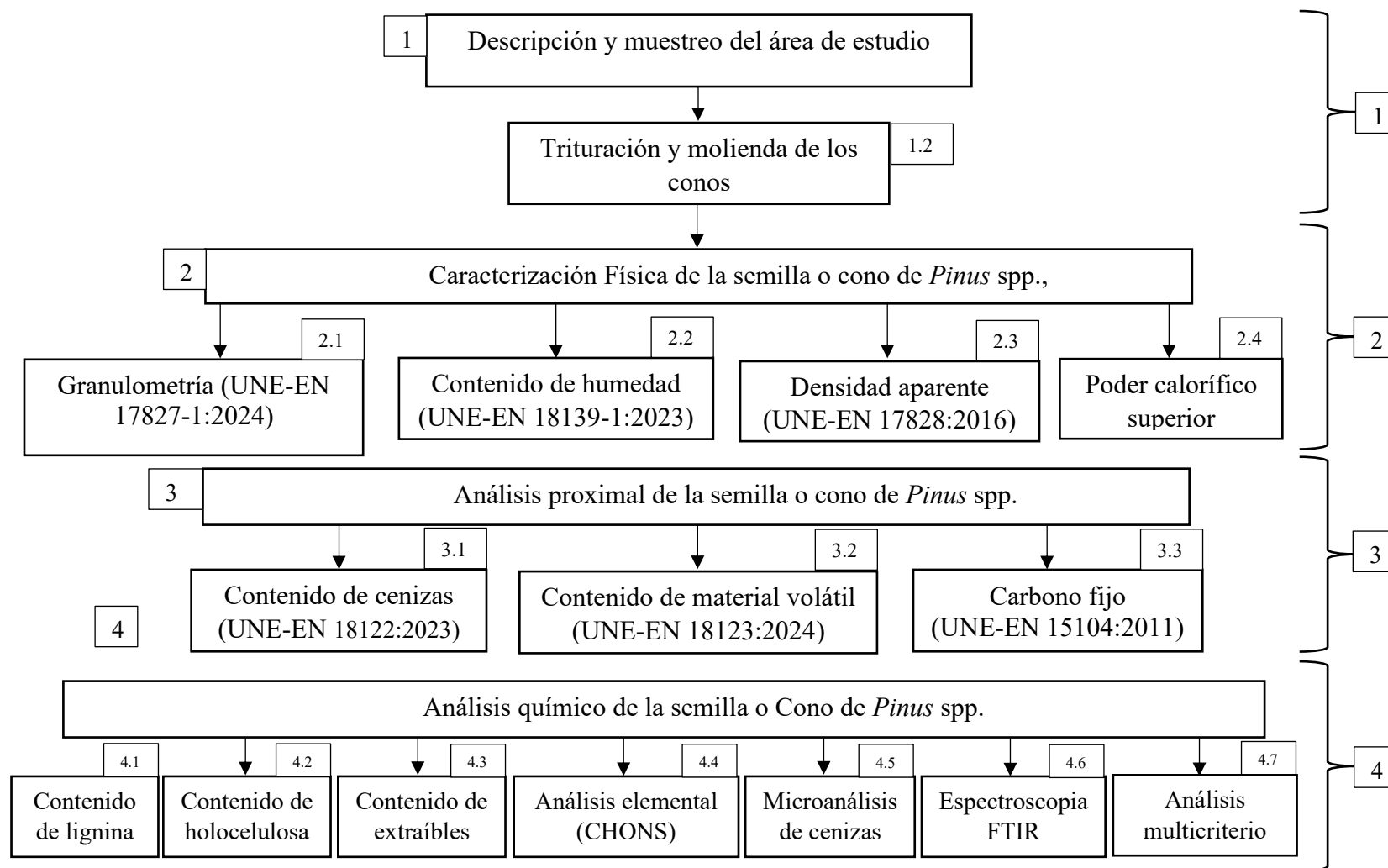


Figura 3.1. Diagrama metodológico.

### 3.2. Descripción del área de estudio

La presente investigación se realizó en la comunidad indígena de San Francisco Pichátaro, municipio de Tingambato, Michoacán, México (Figura 3.2).



Figura 3.2. Ubicación geográfica de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México (Morales-Máximo et al, 2019).

La comunidad indígena de San Francisco Pichátaro se encuentra situada en el municipio de Tingambato (en el estado de Michoacán de Ocampo). Se encuentra a 2,384 metros de altitud y se localiza a 19° 34" N y 101° 40" O. por lo que el clima es mayormente templado con lluvias en verano. Al año 2022 la población estimada en la comunidad es de 5,696 habitantes, por lo que es el segundo pueblo más poblado de todo el municipio (Francisco-Arriaga et al., 2011).

De acuerdo a los estatutos de la comunidad, la mayoría de los comuneros son dueños y trabajadores de los recursos naturales que la comunidad posee (específicamente el bosque), donde en gran medida resalta la reserva forestal con la que esta comunidad cuenta, de la cual los comuneros obtienen el ingreso que les permite adquirir los medios de subsistencia diaria.

Francisco-Arriaga et al (2011) establece que el área boscosa de la comunidad de Pichátaro está cubierta por una importante variedad de especies de pinos y encinos; en el caso de pino las especies predominantes son cancimbo (*Pinus pseudostrobus*), lacio (*Pinus montezumae*) y pino chino (*Pinus leiophylla*); en cambio, en cuanto a las especies de encino se pueden encontrar el encino avellano (*Quercus rugosa*) y el encino laurelillo (*Quercus laurina*).

Por lo anterior se establece que la superficie total de la comunidad de San Francisco Pichátaro es de aproximadamente una superficie total de 9519 ha, de las cuales el área arbolada equivale a 3488 ha y el resto, es decir 6031 ha área no arbolada (Francisco-Arriaga et al., 2011)

### **3.2.1. Muestreo del área de estudio**

La comunidad de San Francisco Pichátaro está dividida en 7 zonas (barrios como ellos les denominan) los cuales son los siguientes: Santos Reyes, San Miguel, San Francisco, Santo Tomas Primero, Santo Tomas Segundo, San Bartolo Primero y San Bartolo Segundo, cada uno de estos barrios tiene su propio recurso forestal lo cual lo utilizan para distintas actividades principalmente dentro de la comunidad (Pérez, 2022).

De las zonas boscosas de la comunidad mencionadas con anterioridad, se estableció llevar a cabo el muestreo en el Bosque del barrio de San Bartolo Segundo (Figura 3.3), ya que se cuentan con aproximadamente cerca de 500 ha. Además, para obtener datos fehacientes, esta es la región boscosa de la comunidad que se encuentra con menor porcentaje de deforestación debido al cuidado que han tenido los propios miembros del barrio al momento de aprovechar este recurso natural y así preservarlo (Ver Anexo 1-A).

El bosque está cubierto por varias especies de pino y encino, predominando en el caso de pino las especies cancimbo (*Pinus pseudostrobus*), lacio (*Pinus montezumae*) y pino chino (*Pinus leiophylla*); en cuanto a los encinos, el encino avellano (*Quercus rugosa*) y el encino laurelillo (*Quercus laurina*). También se encuentran otras especies arbóreas, hierbas y arbustos abarcando un área arbolada de 3488, como ya se mencionó anteriormente (Francisco-Arriaga et al., 2011).

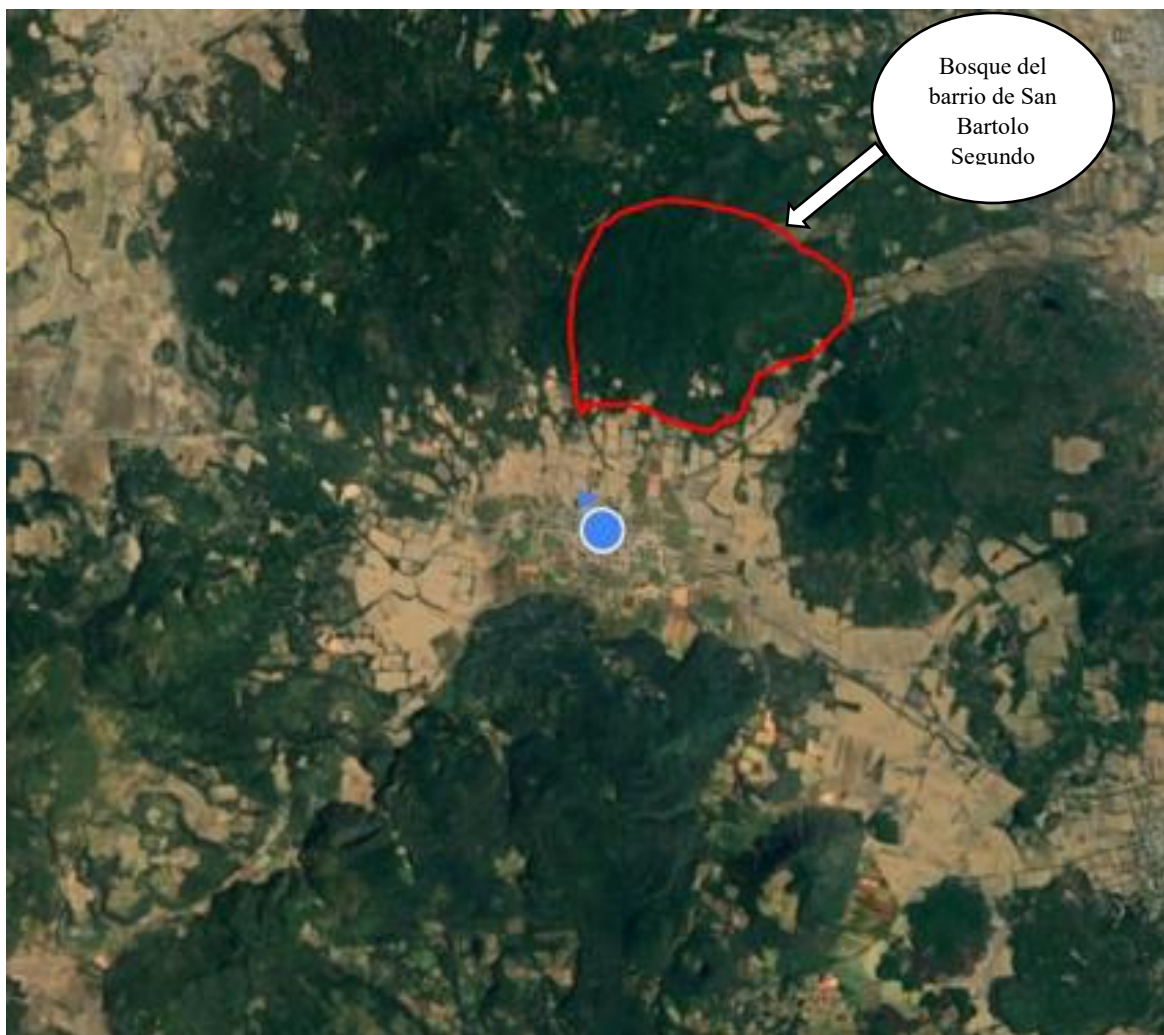


Figura 3.3. Selección de la muestra.

El muestreo de la superficie boscosa se llevó a cabo mediante el trazado en campo de áreas superficiales de  $25\text{m}^2$  (puntos rojos en la figura 3.4 (a)) en diferentes regiones estratégicas del bosque del barrio de San Bartolo Segundo (Figura 3.4). de estas áreas se realizó con la finalidad de abarcar la mayor área posible y de mayor cercanía para poder llevar a cabo el muestreo (ver Anexo 1-B). Además de que, se realizó de manera aleatoria, es decir no se eligieron regiones donde mayormente predominaran los conos de pino, esto con la finalidad de obtener números reales de manera que se simulara la recolección de los conos; y con ello para posteriormente realizar una evaluación de la disponibilidad de este recurso y así estimar el potencial energético disponible en el área boscosa de la comunidad de San Francisco Pichátaro.

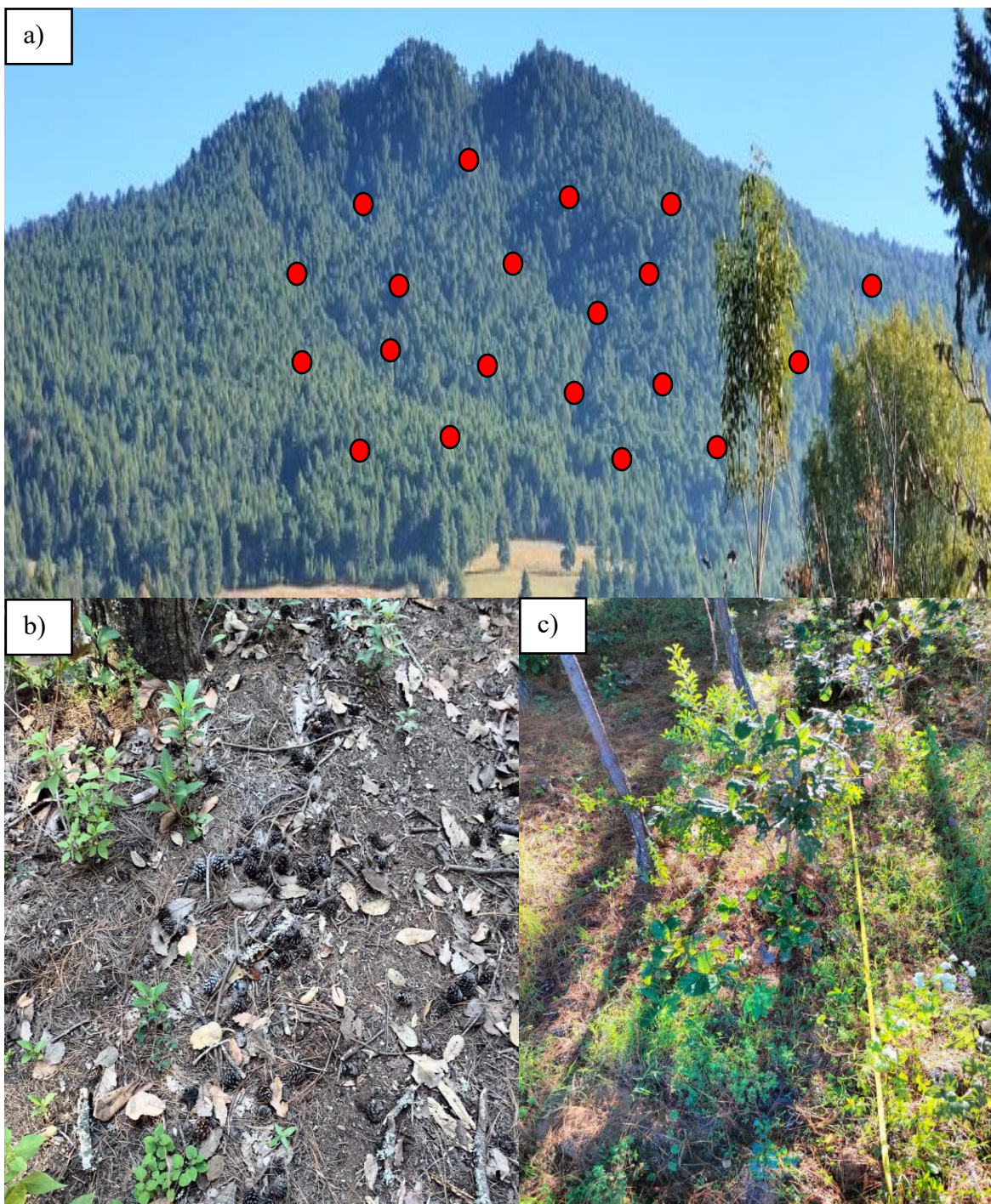


Figura 3.4. a) Bosque del Barrio de San Bartolo Segundo, b) conos de pino en el área de muestreo, c) delimitación del área de muestreo.

### 3.2.2. Trituración y molienda.

En el proceso de molienda, se utilizó un molino de martillos de la marca triunfo, ejerciendo el movimiento de este mediante un tractor Massey Ferguson. La molienda se llevó a cabo a una velocidad de 10,000 revoluciones por minuto, generando el suficiente torque a la toma de fuerza del tractor para mover los martillos del molino y de esta manera llevar a cabo el triturado los conos de pino (Figura 3.5).



Figura 3.5. a) Molino de martillos anclado a un tractor Massey Ferguson, b) conos de pino triturados.

Este proceso se realizó una vez que se limpió el molino de posibles materiales existentes en él, con el objetivo de obtener solo el material deseado que se introdujo. Posterior a ello, se procedió a poner en marcha el tractor, para que a su vez se activara la toma de fuerza y de esta manera los martillos internos del molino trabajasen y así poder introducir los conos de pino para ser triturados. El molino tiene una capacidad de moler cantidades considerables de material debido a su capacidad de molienda de hasta 500 Kg/h de material seco y 1000 kg/h material verde, ya que, debido a las características físicas de los conos de pino, resulto esencial utilizar este tipo de molino, de tal manera que el triturado se llevara de manera más eficaz y sin mayores complicaciones.

### 3.3. Caracterización física de los conos de pino (*Pinus* spp)

#### 3.3.1. Granulometría

La determinación del tamaño de partículas de los conos de pino (granulometría) se realizó en base a la norma UNE-EN 17827-1:2024 (Ver Anexo 2-B) como medida de referencia, haciendo uso de un equipo tamizador vibrante modelo RX-29, con número de serie 10-4795.

El proceso de tamizado se realizó a 10 muestras diferentes de conos de pino recolectados y triturados con anterioridad, en donde cada muestra fue de 50 g, y con un periodo de tiempo de tamizado de 3 minutos respectivamente para cada muestra (Figura 3.7.).



Figura 3.6. a) Conos de pino triturados, b) Tamizador RC-TAP RX-29, c) Tamices ASTM E-11 STANDAR (No 20, 40, 60), d) Distribución granulométrica.

Tabla 3.1. Numero de malla (mm)

| Número de tamiz |
|-----------------|
| 3.35 mm         |
| 2.80 mm         |
| 2.00 mm         |
| 1.40 mm         |
| 0.50 mm         |
| 0.25 mm         |
| Finos mm        |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.2. Contenido de humedad

El contenido de humedad de los conos de pino (*Pinus* spp.) se determinó de acuerdo a los establecido en la norma UNE-EN 18134-1:2023 (Ver Anexo 2-A); en donde mediante un analizador de humedad AE Adam PMB 53 se colocaron 4 gramos de harina de conos de pino (malla 40), que se obtuvieron como resultado del tamizado de la muestra triturada previamente en el proceso de granulometría. El proceso se repitió en 4 ocasiones.

Una lámpara de alógeno de 400 vatios calienta la muestra en incrementos automatizados de 1°C por 20 minutos hasta obtener el porcentaje de humedad de acuerdo con la relación a la pérdida de peso de la muestra una vez que ha estado dentro del analizador (Figura 3.6). Para ello, previamente se tuvo a bien dejar secar la muestra a temperatura ambiente y expuesto al sol por un lapso de 10 días aproximadamente, para que con ello se alcanzara una humedad promedia de acuerdo con las condiciones climáticas del lugar, esto con la finalidad de que, una vez llevado a cabo este proceso, las muestras estuvieran en un nivel de humedad propio, sin que pasen por un proceso previo de secado, y de esta manera obtener un porcentaje de humedad fehaciente en relación a sus propiedades.

En este sentido, de acuerdo con lo establecido por Correa-Méndez et al (2018), el contenido de humedad es muy importante debido a que el poder calorífico de cualquier biocombustible forestal disminuye al aumentar la humedad del mismo.

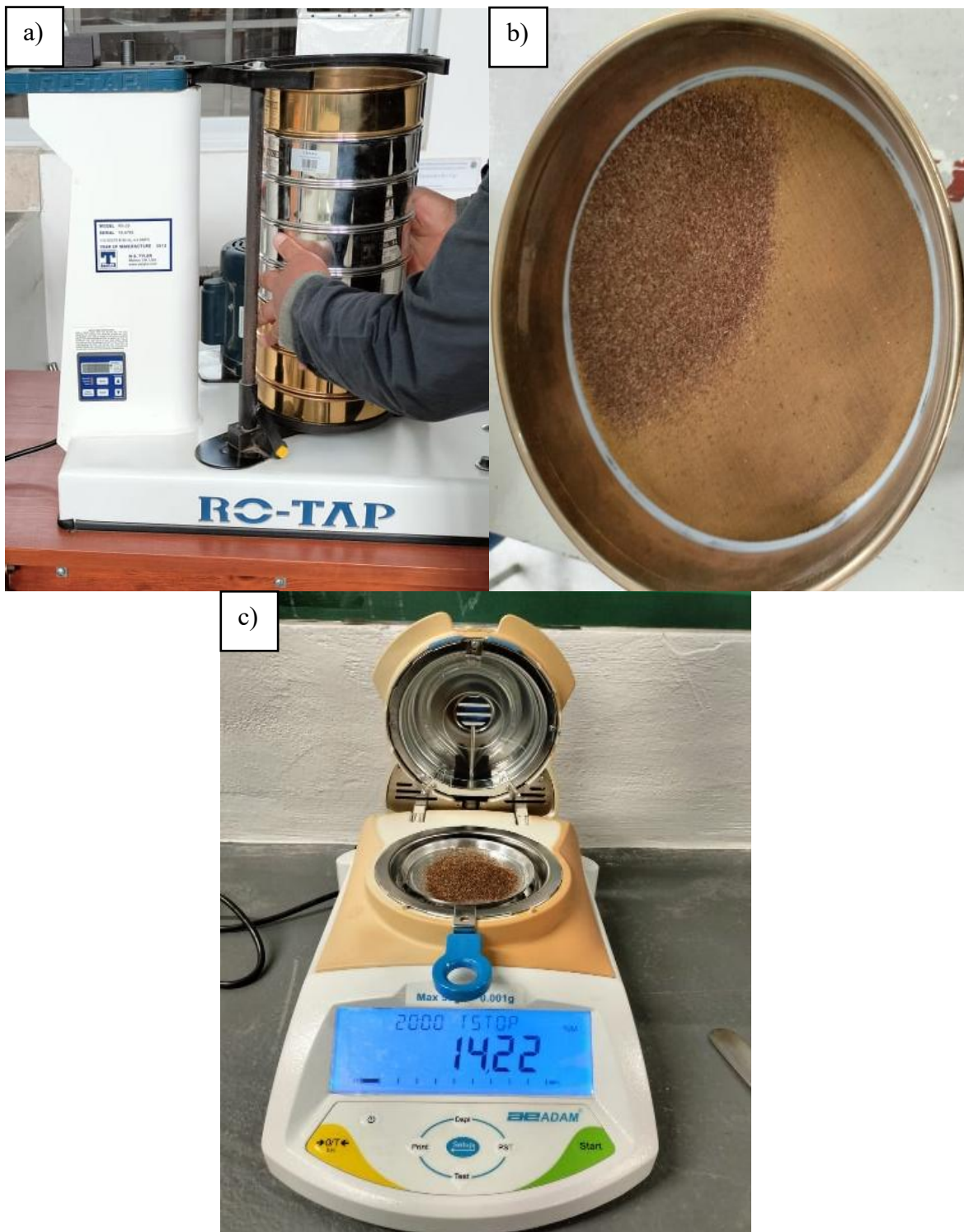


Figura 3.7. a) Tamizador RC-TAP, b) Harina de conos de pino malla 40, c) Analizador de humedad AE Adam PMB 53, d) Distribución granulométrica.

### 3.3.3. Densidad aparente

La densidad aparente de los conos de pino se determinó mediante la norma UNE-EN 17828:2016 (Ver Anexo 2-C) y se utilizará una balanza analítica DENVER INSTRUMENT, como se puede observar en la Figura 3.8.

Para este análisis se estableció repetir el proceso varias veces de tal manera que se pudiera conocer de manera fehaciente la cantidad de harina de conos de pino que correspondiera a la densidad de esta misma, una vez pesada en la balanza de precisión. Para tal efecto, se dejó caer la harina de conos de pino hacia el vaso de precipitado a una distancia de aproximadamente 20 cm, logrando con ello una mayor uniformidad en cuanto a la distribución del material dentro del vaso.



Figura 3.8. Determinación del peso de la muestra de los conos de pino.

### 3.3.4. Poder calorífico

En la determinación del poder calorífico superior, se estableció el procedimiento marcado en la norma UNE-EN 18125:2018 (Ver Anexo 2-D), en donde se utilizó un equipo denominado calorímetro (Figura 3.9) que es un recipiente adiabático que en su interior contiene una bomba de combustión además de agua. Este equipo también cuenta con un agitador y termómetro. Este procedimiento se realizó mediante ignición

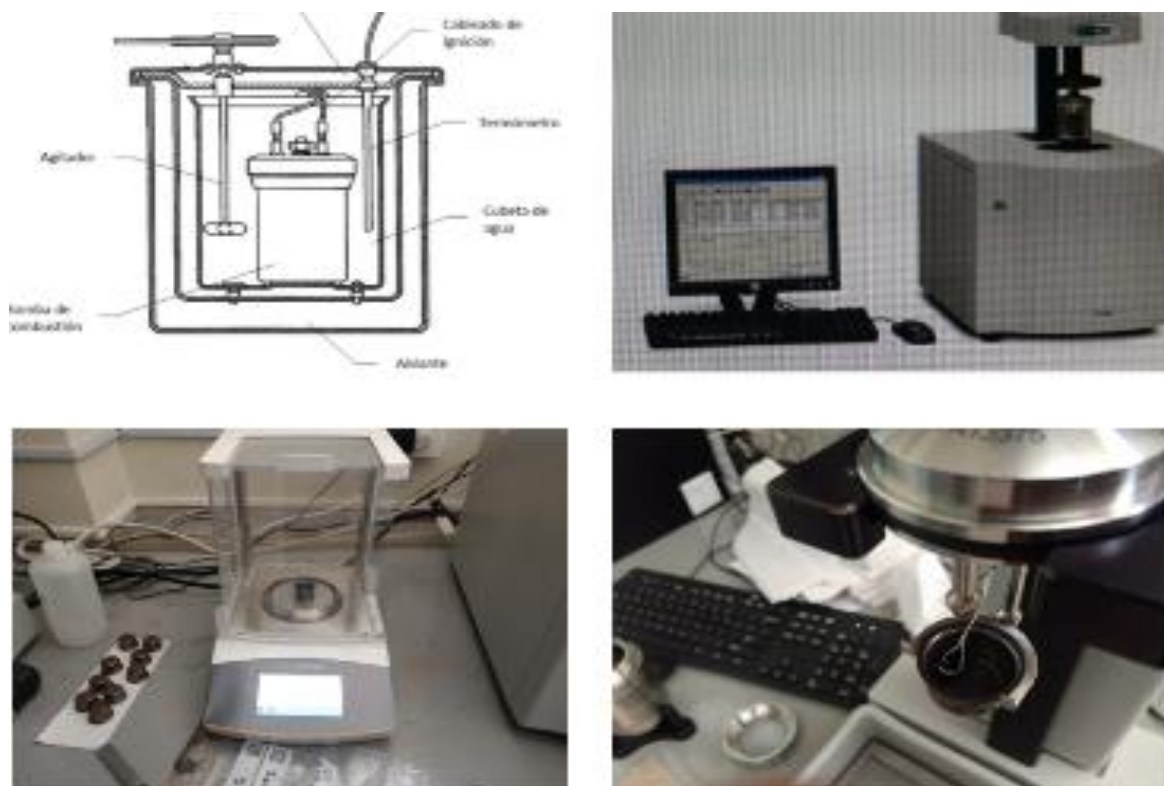


Figura 3.9. Calorímetro (Morales-Máximo et al, 2019).

Para tal efecto, se dispuso a colocar 1 gramo de harina de conos de pino (*Pinus* spp.) en peso anhidro (seco) dentro del recipiente (crisol de cuarzo) de combustión para que quede completamente inmerso dentro del compartimento de agua que se encuentra al interior del dispositivo, además de que, cuenta con un agitador que se encarga de mantener el recipiente en movimiento, esto para lograr una mayor homogeneidad al momento que se llevó a cabo la combustión del material.

Una vez puesto en marcha el calorímetro, la temperatura a la que trabajo fue de 25°C constantes (temperatura que indica la norma), además de que se colocó una muestra basura para calentar el equipo (Ácido benzoico); esto es necesario para que se pueda determinar el poder calorífico, ya que el equipo está diseñado para trabajar con este tipo de material.

### 3.4. Análisis proximal de los conos de pino (*Pinus* spp).

#### 3.4.1. Contenido de cenizas

La determinación del contenido de cenizas de los conos de pino se realizó en base a un proceso estipulado en la norma UNE-EN 18122:2023 (Ver Anexo 2-E). En dicho proceso se dispuso colocar 1 gramo de harina de conos de pino (malla 40) en tres crisoles (previamente lavados y pesados). Posteriormente estos fueron colocados dentro de una mufla Thermo Scientific modelo FB1415M a una temperatura controlada de 550 °C durante un tiempo de 2 horas, esto con la finalidad de que se produzca una pérdida de masa de la harina de conos de pino y con ello contabilizar el contenido de cenizas, tal y como se muestra en la

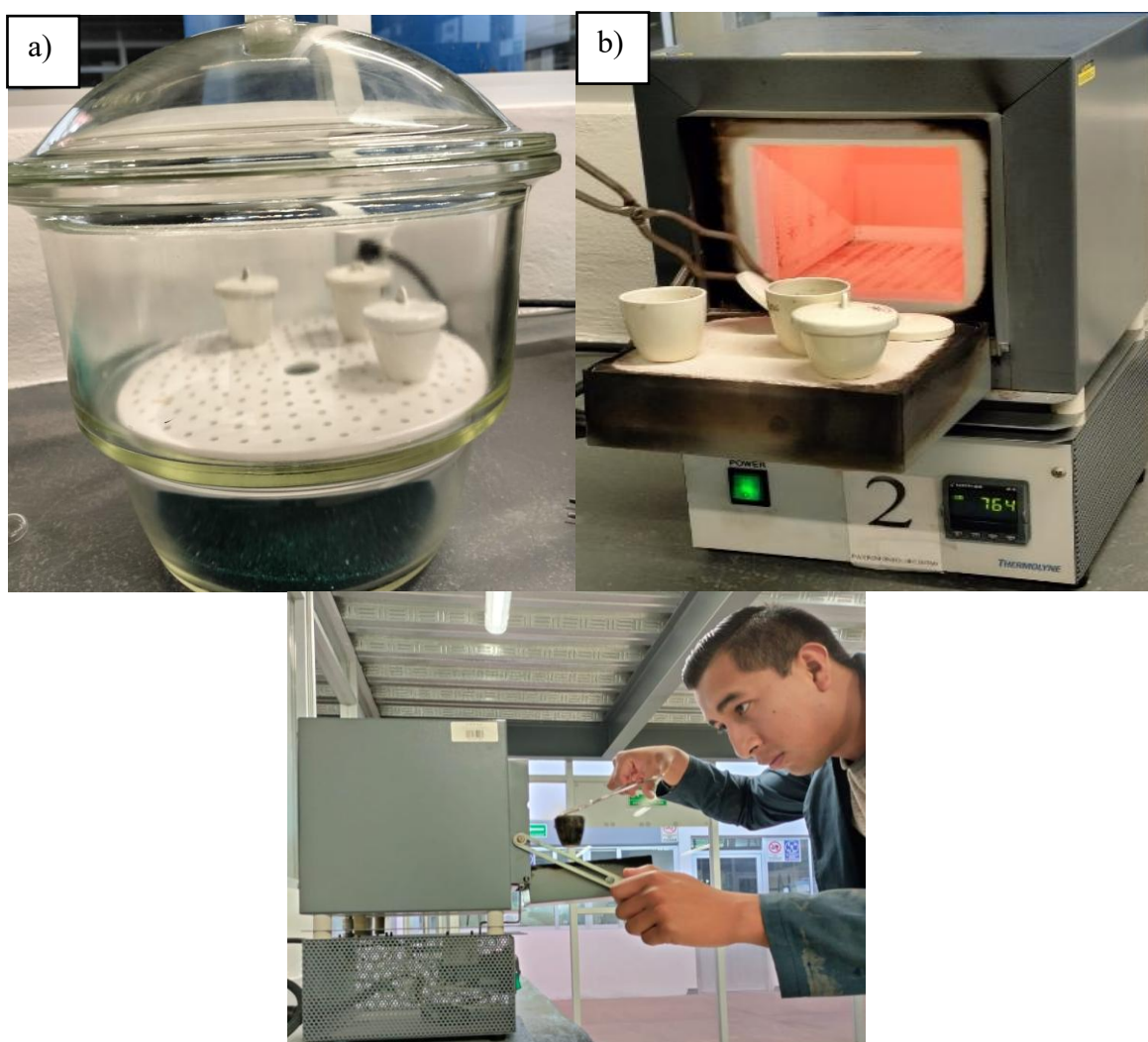


Figura 3.10. a) colocación de la muestra en los crisoles, b) colocación de los crisoles dentro de la mufla a 550°C, d) Introducción de los crisoles dentro de la mufla.

Este proceso se repitió en 3 ocasiones, por lo que se tuvieron tiempos de espera de estabilización de la temperatura en la mufla, ya que en cada repetición al abrir la puerta de la mufla a esta entraba aire frío, lo que provocó disminución de la temperatura deseable de 550°C.

### 3.4.2. Materia volátil

Para obtener el porcentaje de material volátil presente en los conos de pino se basó en el procedimiento establecido bajo la norma UNE-EN 18123:2024 (Ver Anexo 2-F). Para ello se colocaron 1 gramo de harina de conos de pino (malla 40) en tres crisoles diferentes, en peso anhidro.

Posterior a ello, se introdujeron en la mufla Thermo Scientific modelo FB1415M durante un tiempo de 7 minutos a una temperatura de 900 °C constantes. Por último, se dispuso a pesar de nueva cuenta cada uno de los crisoles con la finalidad de analizar y medir la disminución del peso de cada una de las muestras (Figura 3.11).

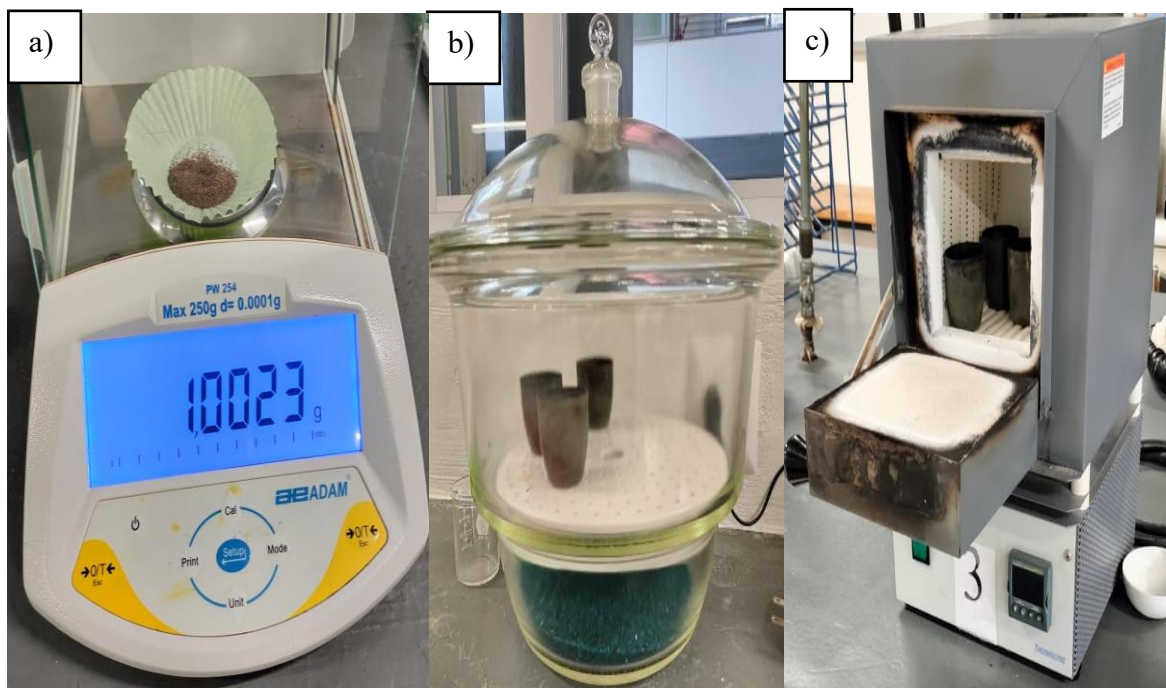


Figura 3.11. a) Peso anhidro de la muestra (1 g), b) Colocación de la muestra en los crisoles, c) Cisol con la muestra dentro de la mufla.

### 3.4.3. Carbono fijo

El carbono fijo se interpreta como la fracción residual del material (biocombustible) que resta una vez se ha pirolizado el material volátil durante las pruebas de laboratorio, para este análisis se realizara mediante el procedimiento expuesto en la norma UNE-EN 15104 (2011) (Ver Anexo 2-H) y siguiendo la ecuación 3.2:

$$CF=100-CZ-MV \quad (\text{Ec. 3.2})$$

En donde:

CF= Es el contenido de carbono fijo en base seca (%)

CZ= Es el contenido de cenizas en base seca (%)

MV= Es el contenido de material volátil en base seca (%)

### 3.5. Análisis químico de los conos de pino (*Pinus spp.*)

#### 3.5.1. Contenido de lignina, holocelulosa y extraíbles

De esta manera, la determinación sobre la composición química de los polímeros que se encuentran en la pared celular de los conos de pino (celulosa, hemicelulosa y lignina), se estableció por medio de un procedimiento de análisis de fibras basado en el método gravimétrico denominado Van Soest utilizando  $\alpha$ -amilasa (Goering HK, 1970). Para ello se tomaron 0.5 g de harina de conos de pino en peso anhidro, en la que el tamaño de partícula fue homogéneo; en una medida de malla 60/40 (0.274/0.516 mm). Para este proceso se utilizó un equipo ANKOM-200 (Musule et al., 2016), tal como se muestra en la figura 3.12.



Figura 3.12. Equipo ANKOM-200 para el análisis de fibras.

### 3.5.2. Análisis elemental (CHONS)

El contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, y azufre se midió en un analizador elemental (Modelo 4010; Costech International S.p.A., Milán, Italia) (Figura 3.13) siguiendo la norma UNE-EN 16948:2015 (Ver Anexo 2-G). Para este caso, se utilizó harina de conos de pino (*Pinus* spp.) en peso anhidro.

En este proceso los gases de combustión  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{N}_2$  se separan mantenida a una temperatura constante que oscila entre  $30^\circ$  y  $110^\circ\text{C}$ . De esta manera la detección y determinación de las diferentes concentraciones de los distintos elementos se realizó mediante un detector de conductividad termica (TCD).

Cabe mencionar que, de acuerdo con las especificaciones del equipo (Figura 3.13), la muestra que se introdujo estuvo en un estado completamente anhidro (seco) y en un tamaño de partícula malla 40 ( $425\ \mu\text{m}$ ), esto debido a que fueron muestras especialmente homogéneas en el rango de micro pesaje. El contenido de oxígeno se calculó por diferencia, y el análisis se realizó sólo una vez.

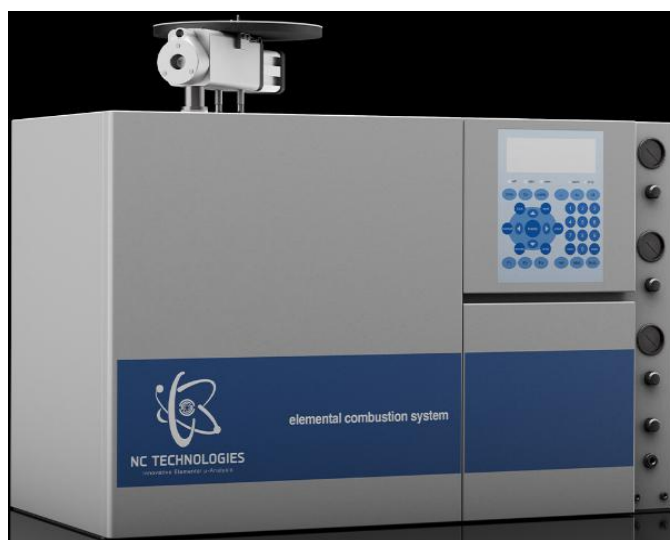


Figura 3.13. Analizador elemental Costech International S.p.A., Milán, Italia. Modelo 4010.

Además, se realizó un análisis de espectroscopia de infrarrojo para complementar la identificación de los compuestos poliméricos en los conos de pino. Se utilizó un equipo Modelo tensor 27 marca Bruker con rango de operación de  $4000$  a  $400\ \text{cm}^{-1}$  y una resolución de  $1$ .

### 3.5.3. Microanálisis de cenizas

Los componentes finales que pueden llegar a estar presentes en las cenizas de cualquier tipo de biomas, dependen en gran medida de varios factores, tales como lo son el origen o lugar de procedencia de la biomasa, el tipo de biomasa, la especie, los procesos y las condiciones de crecimiento, así como el tiempo de cultivo y el método de recolección.

Además de lo anterior, dependerá también de las condiciones al momento de llevar a cabo la de combustión de la biomasa considerando la preparación del combustible, la tecnología y las condiciones de combustión o el sistema de recolección. Vassilev et al. (2013) encontró que, normalmente los elementos en las cenizas de biomasa decrecían en el siguiente orden: O, Ca, K, Si, Mg, Al, Fe, P, Na, S, Mn, Ti. En el microanálisis de las cenizas de las muestras de conos de pino, se utilizó un espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) Varian (Modelo 730-ES; Varian Inc. (Agilent), Mulgrave, Australia) (Arcibar-Orozco et al., 2014) (Figura 3.14); por este medio se buscó la presencia de 29 elementos químicos y el análisis se realizó sólo una vez.



Figura 3.14. espectrofotómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) Varian (Modelo 730-ES)

### 3.5.4. Espectroscopia FTIR

En la última etapa de la caracterización se realizó el análisis FTIR de los conos de pino (*Pinus* spp.), para el cual se utilizó un equipo ThermoFisher Scientific (Figura 3.15). Este análisis emplea la técnica FTIR, la cual utiliza la interferometría (método de medición que se basa en la interferencia de ondas) para registrar de la información proveniente de la muestra de conos de pino (*Pinus* spp.) que se colocó en el haz de infrarrojos. En cuanto la radiación de infrarrojos pasa a través de la muestra, una parte de la radiación es absorbida por la muestra y la otra parte la atraviesa (es decir se transmite). Por lo cual la señal resultante en el detector fue el espectro que representa la “huella” molecular de la muestra de conos de pino (*Pinus* spp.), por lo que una vez obtenido ese espectro, mediante el modelo matemático de la Transformada de Fourier, se pudo convertir la salida del detector en un espectro interpretable, que posteriormente paso por un software de caracterización del propio equipo, para finalmente poder conocer los elementos mayormente presentes en el material.



Figura 3.15. Espectrofotómetro ThermoFisher Scientific (Thermo Fisher Scientific Inc).

### 3.6. Potencial bioenergético

El potencial energético de la biomasa se obtiene a partir de la relación que existe entre la masa de residuo seco ( $Mrs$ ) y la energía del residuo por unidad de masa ( $E$ ) también conocida como Poder Calorífico ( $PC$ ). En la ecuación 3.1 se expresa la relación existente entre las variables y se plantea un modelo matemático aproximado (Serrato Monroy & Lesmes Cepeda, 2016).

$$PE = (Mrs) * (Pc) \quad (Ec. 3.1)$$

Dónde:

$PE$ : Potencial energético [Tj/año]

$Mrs$ : Masa de residuo seco [t/año]

$PC$ : Poder calorífico (MJ/kg)

### 3.7. Análisis multicriterio

El análisis multicriterio de desarrollo con base en parámetros e indicadores del análisis químico, considerando la metodología multicriterio, de tal manera que la evaluación sea con base en criterios de sostenibilidad, esto con el objetivo de establecer un marco normativo que nos ayude a potencializar los aciertos y debilidades con respecto a los análisis realizados en esta investigación (Lopez-Ridaura et al., 2000). Estos datos del análisis químico son prioritarios para evaluar la viabilidad de un biocombustible, ya que proporcionan información acerca de las características del material, tales como son el poder calorífico, contenido de humedad, cenizas, materia volátil, por mencionar algunos.

## **Capítulo IV**

### **Análisis y discusión de resultados**

#### 4.1. Población y muestra.

Del muestreo realizado en el bosque del barrio de San Bartolo Segundo, de la comunidad de San Francisco Pichátaro, se obtuvo que, en cada uno de los puntos analizados la cantidad de conos de pino varia, esto debido a que no se puede precisar la cantidad de conos producidos por cada árbol de pino; sin embargo, se realizó una estimación promedio de la cantidad aproximada, tal y como se puede apreciar en la Figura 4.1.

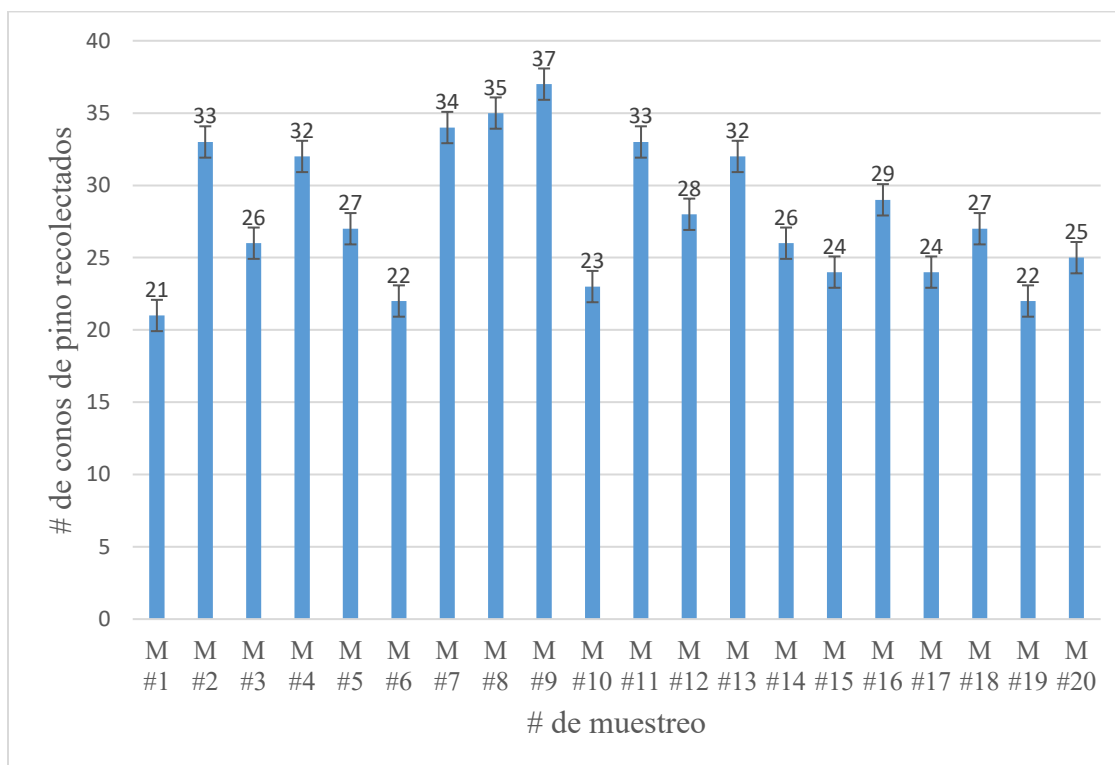


Figura 4.1. Muestreo de los conos de pino.

De la figura anterior podemos denotar que en el área boscosa del barrio de San Bartolo Segundo no existen regiones geográficas muestreadas que presenten un número de conos menor a 20 unidades, es decir que, aproximadamente se pueden encontrar conos en un rango de los 21 a 37 conos de pino por cada área de muestreo ( $25m^2$ ), lo que en promedio representaría 28 conos por cada  $25m^2$  de superficie boscosa, con una desviación estándar de 4.84.

$$\text{Entonces sí: } 25m^2 = 28 \text{ conos de pino}$$

$$1\text{hectarea } (10,000m^2) = 11,200 \text{ conos de pino}$$

Como resultado de la molienda de los conos, se estimó el peso en kilogramos de los conos promedio recolectados en el área superficial boscosa, de tal manera que se obtuvieron los siguientes datos:

$$1 \text{ cono de pino} = (30)g$$

Por lo anterior y siguiendo las reglas matemáticas básicas, se plantea una estimación aproximada de masa total con base al muestreo realizado, en donde:

$$11,200 \text{ conos} \times (30g) = (336,000) g$$

Es decir que, en una hectárea de superficie boscosa, aproximadamente habría **0.336 Toneladas** de conos de pino por año, de acuerdo a la estimación del muestreo realizado en la temporada de otoño (cuando se existe mayor probabilidad de recolectarlos en los bosques).

Ahora bien, de acuerdo con (Francisco-Arriaga et al., 2011), el área boscosa de la comunidad de San Francisco Pichátaro es de aproximadamente 3,488 ha, por lo que con este dato se puede hacer una estimación anual (ya que se pueden obtener una vez al año) de la producción de conos de pino en los bosques de la comunidad, tal y como se describe a continuación:

$$\text{Si: } (0.336)Tn = 1 \text{ ha,}$$

$$\text{entonces: } 3,488 \text{ ha} = (1,171.29) Tn/año$$

Por lo tanto, la estimación anual aproximada de conos de pino en la comunidad de San Francisco Pichátaro es de **1,171.29 Toneladas/año** (Figura 4.2).



Figura 4.2. a) San Francisco Pichátaro, b) Bosque del Barrio de San Bartolo Segundo, c) Conos de pino (*Pinus* spp.).

#### 4.2. Análisis químico de los conos de pino (*Pinus spp.*).

La composición química de la muestra de los conos de pino que se obtuvo, se presenta en la Tabla 4.1. en donde se tuvo a bien realizar 2 pruebas con la finalidad de verificar los resultados de una manera más óptima.

Tabla 4.1. Composición química de los conos de pino (*Pinus spp.*)

| Muestra | Celulosa | Hemicelulosas | Lignina | Extraíbles |
|---------|----------|---------------|---------|------------|
| M1      | 36.95%   | 9.56%         | 39.67%  | 13.11%     |
| M2      | 36.82%   | 8.13%         | 40.87%  | 13.38%     |

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a (A. Á. Rodríguez et al., s/f), se establece que el análisis químico realizado confirma de manera contundente que el componente mayoritario de la biomasa lignocelulósica es la celulosa, seguido de lignina y hemicelulosa (Figura 4.3).

Dicho lo anterior, el poder calorífico está íntimamente relacionado con el contenido de componentes estructurales de la biomasa, específicamente con el contenido porcentual de lignina, por lo que se puede deducir que, la biomasa entre más contenido de lignina presente en su estructura, mejor será su poder calorífico y, en consecuencia, su uso como biocombustible será cada vez más potencial humedad (Rutiaga-Quñones et al., 2020).

De acuerdo con Bernabé-Santiago et al. (2013), la composición química de la madera de los pinos mexicanos se ha estudiado para pocas especies. Pero estudios recientes realizados por Chávez-Rosales et al. (2021), muestran que la composición química de la madera y de la biomasa de pino tiene potencial para obtener biocombustibles sólidos densificados. Este análisis permite estimar el potencial energético disponible en los residuos de pino.

### 4.3. Contenido de humedad

En la Figura 4.3 se puede observar la humedad inicial encontrada en las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.) recolectados en el bosque, en donde se obtuvo que en promedio la humedad inicial de este material fue de 14.22 %, encontrándose por debajo de datos reportados (Correa-Méndez et al., 2018) para este parámetro.

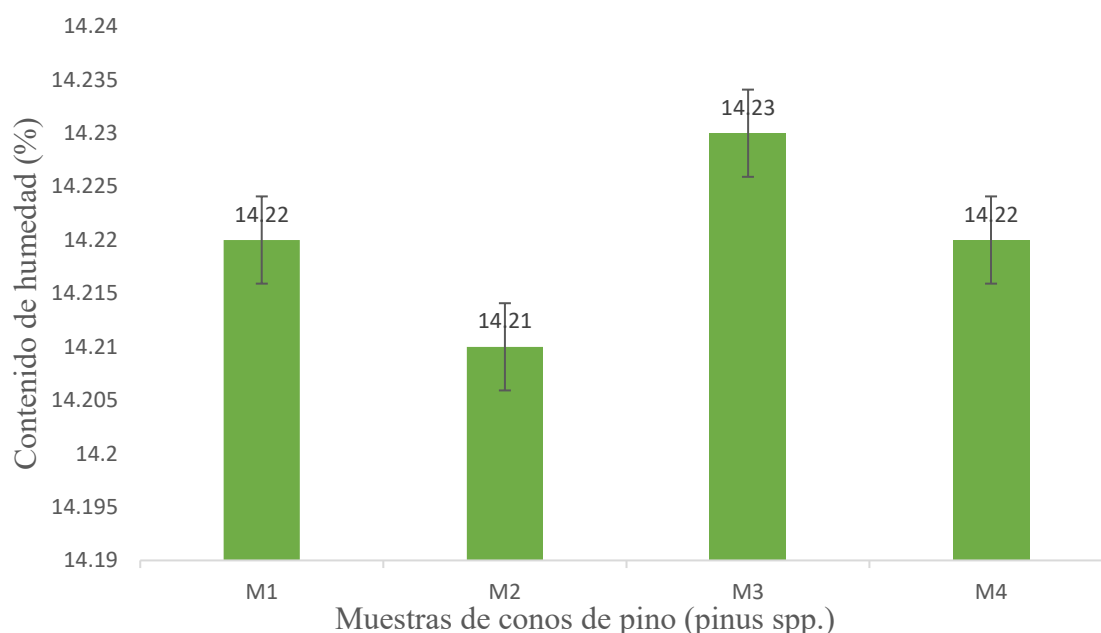


Figura 4.3. Humedad inicial de las muestras de conos de pino.

Estando el material en un ambiente estable de acuerdo a la norma UNE-EN 14774-1 (2010) el porcentaje final de humedad se estableció en un promedio de 14.22 %; por lo que de acuerdo a los datos reportados previamente por (Pintor- Ibarra, Carrillo-Parra, et al., 2017) se encuentran en un rango aceptable, además de que se puede denotar que su valor porcentual se encuentra por debajo de otros datos reportados (Correa-Méndez et al., 2014).

Con ello se establece que el material a temperatura ambiente, presenta un porcentaje de humedad aceptable para que pueda llevarse a cabo su uso pertinente en la elaboración de biocombustibles sin la necesidad de llevar a cabo procesos de secado previamente.

#### 4.4. Granulometría

El resultado de la distribución granulométrica de las partículas de conos de pino (*Pinus* spp.) retenidas en los 7 tamices, presentaron diferencias significativas en cuanto al tamaño de partícula, esto considerando que se llevó a cabo una sola molienda de estos. Los tamices que presentaron el mayor porcentaje de retención de partículas de conos de pino fueron los tamices (<3.35 mm) con el 30% del material, seguido del tamiz (2.8 mm) con un 20.18%, el tamiz (2.0 mm) con un 18.24%, y el tamiz (3.35mm) con un 12 % (Figura 4.4).

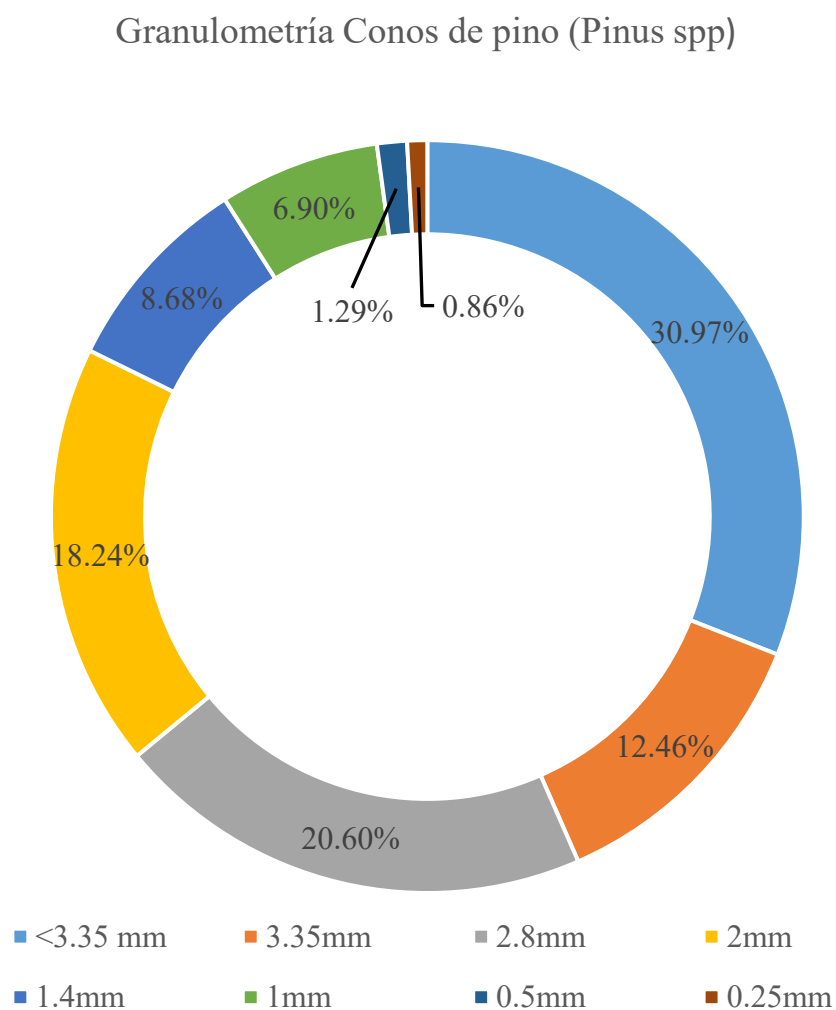


Figura 4.4. Porcentajes de granulometría de conos de pino (*Pinus* spp.).

Aproximadamente el 69.81 % de las partículas de conos de pino (*Pinus* spp.) se concentraron en los tamices <3.35, 2.8 y 2.0 mm. Estos valores se encuentran cercanos al límite establecido por (Oberberger and Thek, 2010 s/f) quienes señalan que, las dimensiones óptimas para la producción de pellets son menores a 5 mm.

Dicho lo anterior y como resultado del análisis de la granulometría denotan que, el tamaño de partícula de las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.) aproximadamente el 70 % de lo tamizado solo puede ser aprovechado para la fabricación de pellets, esto por el tamaño de partícula, el otro 30 % de las muestras, sugiere dos opciones: como primera opción volver a moler y obtener un nuevo porcentaje; y segundo determinar su pertinencia en la fabricación de briquetas.

#### 4.5. Densidad aparente

La determinación de la densidad aparente de los conos de pino (*Pinus* spp.) se estableció en valores que oscilan entre 251.743 kg/m<sup>3</sup> a 278.269 Kg/m<sup>3</sup>, tal y como se puede observar en la Figura 4.5.

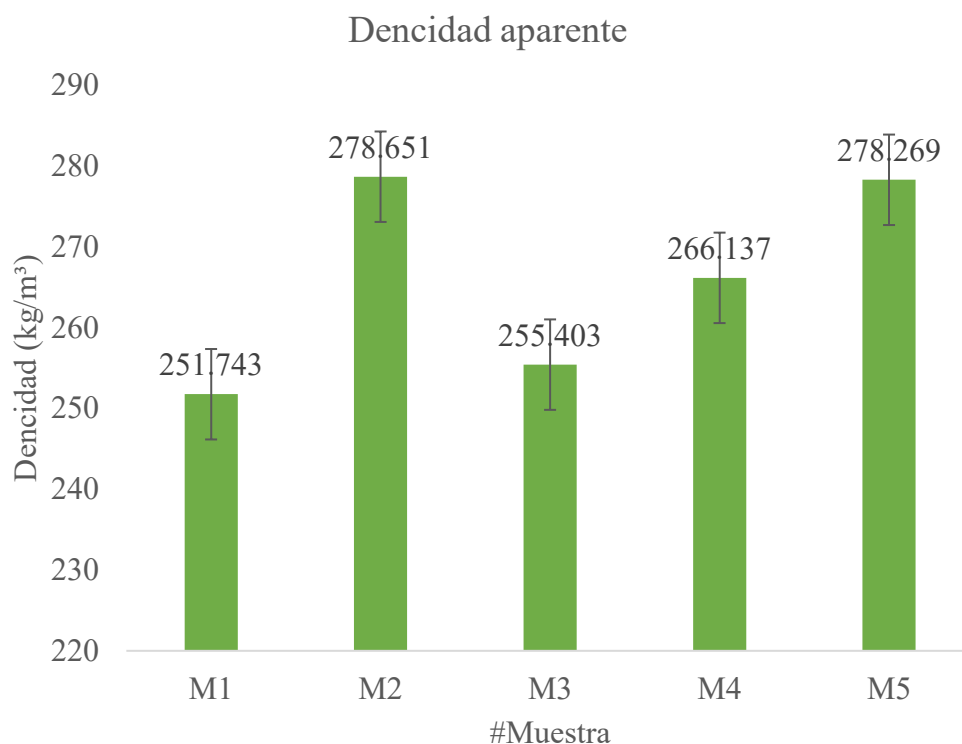


Figura 4.5. Densidad aparente de los conos de pino (*Pinus* spp.)

De acuerdo a Correa-Méndez et al. (2014), el porcentaje estimado en cuanto a densidades aparentes reportadas en maderas de coníferas oscilan en valores de 160 y 330 kg/m<sup>3</sup>. La densidad a granel, para las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.) oscilan entre 251.74 a 278.65 kg/m<sup>3</sup>. Otros datos muestran valores entre 160 y 235 kg/m<sup>3</sup> (Ortiz et al., 2003) (Morales-Máximo et al., 2020).

De acuerdo con lo anterior, la densidad aparente estimada de la harina de conos de pino (*Pinus* spp.) se encuentra dentro de los parámetros aceptables reportados por investigaciones anteriores (Pintor-Ibarra et al., 2017).

#### 4.6. Poder calorífico

La característica fundamental de un biocombustible es el valor porcentual de su poder calorífico, infiriendo con ello el potencial aprovechamiento de dicho material en las reacciones de combustión. Un poder calorífico alto indica un buen combustible, por el contrario, un bajo poder calorífico indica que el material difícilmente será bueno al momento de llevar a cabo la combustión. Para el caso del poder calorífico de las muestras analizadas los resultados se muestran a continuación (Tabla 4.2.)

Tabla 4.2. Poder calorífico de las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.).

| Numero de muestra | Poder calorífico (MJ/Kg) |
|-------------------|--------------------------|
| Conos de pino 1   | 20.7674                  |
| Conos de pino 2   | 20.7973                  |
| Conos de pino 3   | 20.7361                  |
| Promedio          | 20.7669                  |

Fuente: Elaboración propia

El poder calorífico se encuentra en un rango de entre 20.7361 MJ/kg a 20.7973 MJ/kg, siendo este poder calorífico de un valor aceptable dentro de las especies de *Pinus* spp., de acuerdo a valores de poder calorífico presentados por Orihuela et al., (2016) para la generación de briquetas. Aunado a esto, otros datos reportan un poder calorífico entre 17.0 MJ/kg a 18.3 MJ/kg (Morales-Máximo et al., 2018). Cabe denotar que los datos obtenidos para esta investigación se encuentran en un rango aceptable en comparación con otras investigaciones, por lo cual se concluye que el material lignocelulósico proveniente de los

conos de pino (*Pinus* spp.) de la comunidad de San Francisco Pichátaro presentan un excelente poder calorífico, apto para las reacciones de combustión.

#### 4.7. Contenido de cenizas

El porcentaje de cenizas está definido por el cociente en valor porcentual de la muestra calcinada y la muestra seca, es decir que para ello se requiere la muestra en condiciones de base anhidra. Los resultados obtenidos para 4 muestras de conos de pino se pueden observar en la Figura 4.6.

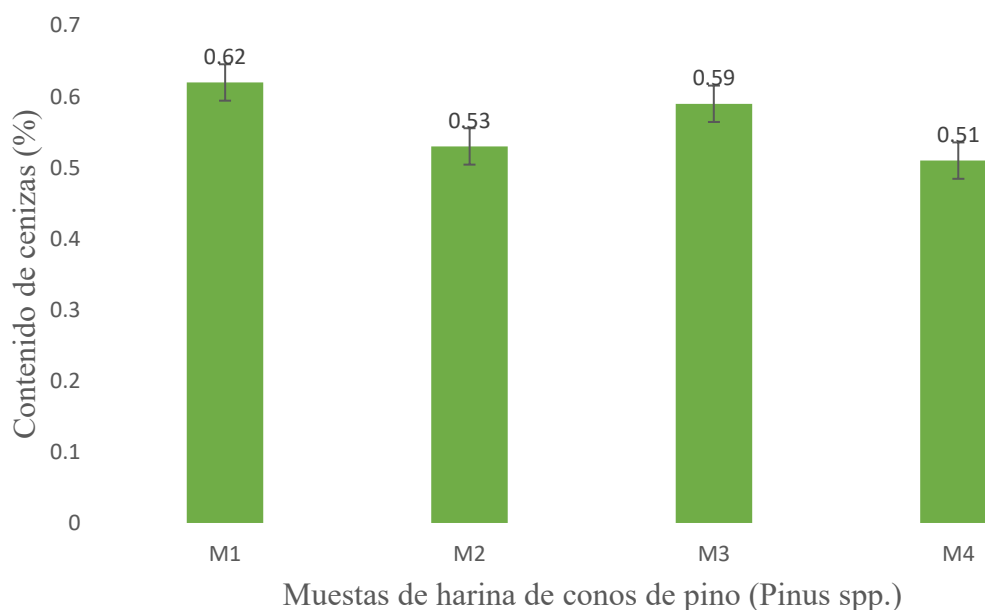


Figura 4.6. Contenido de cenizas en las muestras de conos de pino (%).

El análisis realizado a las muestras de conos de pino establece que, el nivel de precisión refiere que de los resultados obtenidos en la determinación del porcentaje de ceniza no debe diferir entre ellos en valores relativos más que el 10%. Para el caso de este análisis los resultados se encuentran en un rango de 0.51% a 0.62% en las cuatro muestras; por lo cual cumplen con este parámetro y concuerdan con datos reportados con anterioridad (Correa-Méndez et al., 2014), donde los análisis están en un rango de 0.28% a 1.25%. Otros datos reportan contenido de cenizas de 0.38% a 1.78% en maderas de las especies de *Pinus* spp. (Morales-Máximo et al., 2018).

#### 4.8. Contenido material volátil

El porcentaje de material volátil se determina mediante el desprendimiento de masa que experimenta la muestra debido a la pérdida de humedad. Los resultados obtenidos de este análisis fueron los siguientes (Figura 4.7).

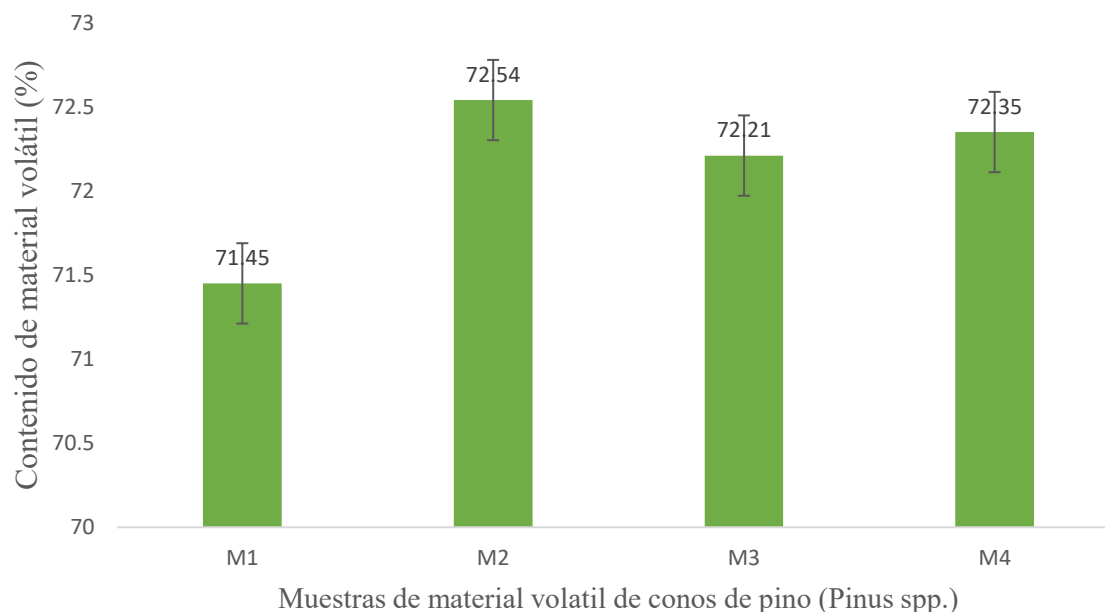


Figura 4.7. Material volátil presente en los conos de pino

El rango de error o de precisión aceptable en la determinación de los porcentajes de materiales volátiles no deben diferir en más del 2%. Los resultados obtenidos en esta prueba muestran que no varían uno de otro más del 2%, los rangos de variación se encuentran entre 1.14% a 1.09%, como se puede observar en la Figura 4.6, por lo tanto, los contenidos de material volátil para las muestras de conos de pino se encuentran entre 71.45% a 72.35% de volatilidad. Los valores encontrados son similares a los reportados previamente (Antwi-Boasiako & Acheampong, 2016) y muestran que el material volátil se encuentra en un rango que va del 80.84% a 81.27% de volatilidad para muestras maderable de pino, otros datos reportan 91.26% a 95.01% de volatilidad para muestras de viruta y 65.3% a 90.29% para muestras de aserrín (Morales-Máximo et al., 2018).

#### 4.9. Carbono fijo

Una vez que se desarrolló la fórmula matemática para obtener los porcentajes de carbono fijo en base a los datos propuestos en el capítulo anterior, en la tabla 4.3 se presentan los valores obtenidos en relación al contenido porcentual de carbono fijo derivado de las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.).

Tabla 4.3. Carbono fijo

| #Muestra | Carbono fijo (%) |
|----------|------------------|
| M1       | 27.93            |
| M2       | 26.93            |
| M3       | 27.2             |
| M4       | 27.14            |

Fuente; Elaboración propia

Los valores mostrados en la tabla anterior establecen que el porcentaje de carbono fijo presente en las muestras de harina de conos de pino (*Pinus* spp.) se encuentran en un rango de entre 26.93% a 27.93%, que una vez analizando los datos en comparación con los aportados en otras investigaciones resultan menores, ya que se han reportado valores que van desde 48.80% a 50.30% (Mishra & Mohanty, 2018), esto en cuanto a materiales de la especie de *Pinus* se refiere.

Sin embargo, en la literatura se han encontrado el caso contrario, valores más bajos que el de esta investigación, que rondan de entre 12.20% (Mishra & Mohanty, 2019), 16.76% (Rahman et al., 2020), de 15.96% (Muley et al., 2016) y 4.49% a 34.35%, de carbono fijo (Morales-Máximo et al., 2020).

Es de mencionar que, para la obtención de estos valores, se tuvo a bien estar en un ambiente controlado (laboratorio), por lo que al momento de realizar las pruebas las muestras de harina de conos de pino (malla 40) se tuvieron en resguardo y bajo un control de que ningún otro material estuviese mezclado, ya que de lo contrario los resultados podrían haber sido afectados.

#### 4.10. Análisis elemental

Los resultados del análisis elemental de las muestras de conos de pino (*Pinus spp.*) se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Análisis elemental de las muestras de conos de pino (*Pinus spp.*)

| #Muestra | C      | H     | O      | N     | S  |
|----------|--------|-------|--------|-------|----|
| M1       | 48.57  | 5.96  | 44.42  | 1.05  | ND |
| M2       | 47.987 | 6.137 | 45.49  | 0.379 | ND |
| M3       | 48.79  | 5.985 | 44.796 | 0.419 | ND |
| M4       | 48.123 | 6.093 | 45.374 | 0.4   | ND |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostrados en la tabla en la Tabla 4.3 coinciden en gran medida con valores reportados para diferentes tipos de biomasa (Vassilev et al., 2010). Una característica importante a destacar, es que el porcentaje de nitrógeno y azufre en los conos de pino resultó ser bajo, tal y como lo muestran los resultados. Por otro lado, el carbón y el oxígeno son componentes principales de los biocombustibles sólidos y son los que principalmente participan en la reacción exotérmica durante la combustión, produciendo con ello CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (Oberberger & Thek, 2010). El contenido de carbono osciló entre el 47.987% al 48.79%, el oxígeno se encontró entre 44.42% a 45.49%, y para el hidrogeno fue de 5.96% a 6.137%; así que de esta manera se puede inferir que los resultados obtenidos coinciden en gran medida con lo reportado previamente por investigaciones recientes (Lin et al., 2019) (Rutiaga-Quñones et al., 2020) (Taylor et al., 2020).

El análisis elemental incluye el porcentaje en peso de C, H, O, N, S, cenizas, humedad (pérdida de peso a 105 °C, para combustibles sólidos) y agua combinada (equivalencia de oxígeno. La cantidad de oxígeno presente en los combustibles reduce el poder calorífico, sin embargo, contribuye a reducir las necesidades de aire de combustión. El contenido de nitrógeno y azufre tiene un impacto directo en los efectos derivados de la lluvia ácida (Fernández et al., 2017).

El análisis elemental permitió determinar el contenido elemental presentes en los conos de pino (*Pinus spp.*), pero solamente aquellos que supondrán un aporte calorífico en las reacciones de combustión.

#### 4.11. Microanálisis de cenizas

Como resultado del microanálisis de cenizas respecto de los conos de pino (*Pinus* spp.), se puede observar la presencia de una amplia variedad de elementos químicos detectados en la muestra, tal y como se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Microanálisis de cenizas de las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.) (ppm).

ND= no detectado

| Analito | Muestra  |
|---------|----------|
| Ag      | ND       |
| Al      | 22293.99 |
| As      | ND       |
| B       | 66.93    |
| Ba      | 258.95   |
| Be      | ND       |
| Ca      | 42035.69 |
| Cd      | ND       |
| Co      | ND       |
| Cr      | 34.32    |
| Cu      | 154.54   |
| Fe      | 50629.34 |
| K       | 44332.93 |
| Li      | 38.52    |
| Mg      | 18432.29 |
| Mn      | 1056.2   |
| Mo      | ND       |
| Na      | 2721.5   |
| Ni      | 25.03    |
| P       | 13654.95 |
| Pb      | 61.69    |
| S       | 8865.26  |

|    |        |
|----|--------|
| Sb | ND     |
| Se | ND     |
| Si | 2139.1 |
| Sn | 17.93  |
| Sr | 270.17 |
| Tl | ND     |
| V  | 39.47  |
| Zn | 342.82 |

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de estos resultados, resalta la presencia de los elementos químicos que más comúnmente se encuentran presentes en la madera, tal y como son: potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), principales componentes de las sustancias inorgánicas de la madera (Fengel & Wegener, 1983), y que en consecuencia estas sustancias se encuentran presentes hasta en un 80 % de probabilidad en las cenizas (Ulmgren, 1997). De manera general los resultados obtenidos coinciden con resultados previos reportados para diferentes maderas (Rutiaga-Quñones et al., 2020) (Pintor-Ibarra, Carrillo-Parra, et al., 2017) (Magdziarz et al., 2016).

#### 4.12. Espectroscopia FTIR.

Mediante la espectroscopia FTIR, se pudo conocer algunos de los grupos funcionales vinculados a los compuestos que son relevantes en el estudio de residuos utilizados para la fabricación de biocombustibles sólidos.

Para tal efecto, se tuvo a bien resguardar las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.), de tal manera que al momento de introducirlas en el equipo de espectrofotometría no estuviesen contaminadas con partículas de otro material, ya que en su defecto el espectro o huella de la muestra podría salir alterado con la presencia de otros elementos que no precisamente fuesen de la muestra de conos de pino. En cuanto a los elementos encontrados en el espectro, principalmente fueron celulosa, hemicelulosa y lignina, tal y como se esperaba, ya que se trata de un material orgánico proveniente de un recurso forestal como lo es la madera de pino. A continuación, se describen las bandas encontradas en el espectro (Figura 4.8).

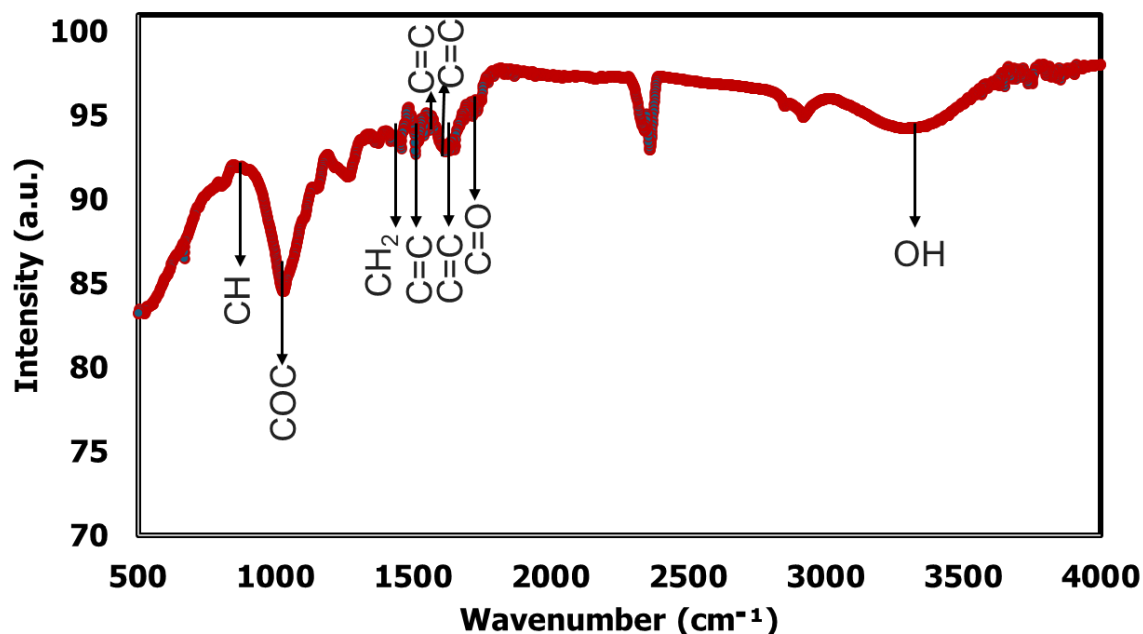


Figura 4.8. Grafica de espectroscopia FTIR de los conos de pino (*Pinus* spp.).

Se pueden observar las intensidades de las bandas en zonas entre  $800\text{ cm}^{-1}$  y  $1400\text{ cm}^{-1}$  y cerca de  $3500\text{ cm}^{-1}$ , estas bandas se atribuyen a compuestos poliméricos (Morales-Maximo, 2022) (López-Sosa, 2020). Específicamente, las bandas entre  $1630\text{ cm}^{-1}$  y  $1406\text{ cm}^{-1}$  representan estiramiento de  $\text{C}=\text{C}$  y que se atribuyen a la presencia de lignina y compuestos aromáticos. La banda afiliada a  $1045\text{ cm}^{-1}$  es indicativa de estiramiento de  $\text{COC}$  en el xilano de la hemicelulosa (López-Sosa, 2020). Se identificaron también las bandas a  $887\text{ cm}^{-1}$  para  $\text{CH}$  correspondientes a la flexión de la celulosa (Morales-Maximo, 2022),  $1463\text{ cm}^{-1}$  para el estiramiento por flexión de  $\text{CH}_2$  en lignina y xilano,  $1734\text{ cm}^{-1}$  para  $\text{C}=\text{O}$  no conjugado en xilanos (hemicelulosa) y en bandas de  $3400\text{ cm}^{-1}$  para el estiramiento en  $\text{OH}$  (Morales-Maximo, 2020) (T. Zhang, 2018). La banda de  $1616\text{ cm}^{-1}$  representa el estiramiento  $\text{C}=\text{C}$  y sugiere la presencia de lignina y compuestos aromáticos. La banda a  $1055\text{ cm}^{-1}$  es indicativa del estiramiento de  $\text{COC}$  en el xilano de la hemicelulosa (Thompson, 2020) (Tapia-Tussell, 2019).

Esto demuestra la presencia de compuestos como celulosa, hemicelulosa y lignina, lo cuales contribuyen de diversas formas en los materiales utilizados para biocombustibles sólidos.

#### 4.13. Análisis multicriterio

El análisis multicriterio se utilizó como una métrica para evaluar el potencial bioenergético de los conos de pino (*Pinus* spp.), como un biocombustible de tipo sólido, realizando una comparativa de sus principales características químicas respecto a otros biocombustibles de tipo sólido como los son la madera de pino y encino.

##### 4.13.1. Parámetros e indicadores

La métrica comparativa para el análisis multicriterio se basó en la comparativa de los parámetros más destacados del material lignocelulósico, en donde se eligieron 7 indicadores (tabla 4.6) que establecen la pertinencia para la utilización de dicho material en forma de biocombustibles densificados.

Tabla 4.6. Parámetros e indicadores a evaluar.

| Parámetro               | Indicador            |
|-------------------------|----------------------|
| Caracterización Física  | Poder Calorífico     |
|                         | Contenido de Humedad |
| Caracterización Química | Celulosa             |
|                         | Hemicelulosa         |
|                         | Lignina              |
| Análisis Proximales     | Cenizas              |
|                         | Material Volátil     |

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a (Urieta, 2023) los polímeros que provienen de fuentes naturales son un tipo de materia energética compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina que en conjunto integran el material lignocelulósico presente en la madera, cultivos, residuos agrícolas y forestales, en donde su poder calorífico puede rondar entre los 14 hasta los 23 MJ/kg, esto dependiendo de la procedencia del material.

Dichas características, permiten que este tipo de material lignocelulósico pueda tener una infinidad de aplicaciones, por lo que resulta bastante optimo su análisis para la determinación de su posible uso como biocombustible de tipo solido (densificado), además de que, por su alto contenido de carbono, los compuestos poliméricos tienen una alta

probabilidad de ser empleados como combustibles de tipo solido incluyendo su capacidad para liberar energía durante la combustión (Urieta, 2023).

#### 4.13.2. Valores reales de los conos de pino.

Los valores de los indicadores de los conos de pino se obtuvieron como resultado de pruebas de laboratorio, en donde se establecieron criterios para su determinación, y cuyos resultados se presentan a continuación (tabla 4.7).

Tabla 4.7. Valor porcentual de indicadores (Conos de *Pinus* spp.).

| Parámetro               | Indicador            | Valor (%) |
|-------------------------|----------------------|-----------|
| Caracterización Física  | Poder Calorífico     | 21.56     |
|                         | Contenido de Humedad | 14.22     |
| Caracterización Química | Celulosa             | 36.88     |
|                         | Hemicelulosa         | 8.84      |
|                         | Lignina              | 40.27     |
| Análisis Proximales     | Cenizas              | 0.62      |
|                         | Material Volátil     | 71.73     |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.13.3. Conos de pino y residuo de Quercus.

Para este estudio, se determinó realizar la métrica comparativa de los conos de pino (*Pinus* spp.) y residuos maderables de Encino (*Quercus* spp.), cuyos valores reales de los indicadores se obtuvieron de la literatura correspondiente para cada caso (tabla 4.8).

Tabla 4.8. Valores de indicadores de conos *Pinus* spp. y residuos de *Quercus* spp.

| Indicador                | Conos de <i>Pinus</i> spp. | Residuo de <i>Quercus</i> spp. |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Poder calorífico (MJ/Kg) | 20.76                      | 19.5 (Núñez-Retana, 2020)      |
| Celulosa (%)             | 36.88                      | 38.4 (Ruiz Cuiltly, 2017)      |
| Hemicelulosa (%)         | 8.84                       | 24 (Ruiz Cuiltly, 2017)        |
| Lignina (%)              | 40.27                      | 24.5 (Ruiz Cuiltly, 2017)      |
| Humedad (%)              | 14.22                      | 25 (Núñez-Retana, 2020)        |
| Cenizas (%)              | 0.62                       | 0.95 (Núñez-Retana, 2020)      |

|                      |       |                            |
|----------------------|-------|----------------------------|
| Material Volátil (%) | 71.73 | 87.33 (Núñez-Retana, 2020) |
|----------------------|-------|----------------------------|

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.13.4. Valores máximos y mínimos.

La ponderación de los valores máximos y mínimos se realizó de acuerdo a la literatura citada, en donde se visualiza el mejor escenario posible para la determinación de un biocombustible densificado.

Tabla 4.9. Máximos y Mínimos.

| Indicador                | Valor Máximo                  | Valor Mínimo |
|--------------------------|-------------------------------|--------------|
| Poder calorífico (MJ/Kg) | 20.92 (Ngangyo-Heya, 2016)    | 0            |
| Celulosa (%)             | 53.3 (Morales-Máximo, 2020)   | 0            |
| Hemicelulosa (%)         | 87.11 (Cavali, 2020)          | 0            |
| Lignina (%)              | 43.37 (Bolzon De Muñiz, 2014) | 0            |
| Humedad (%)              | 56 (Correa-Méndez, 2018)      | 0            |
| Cenizas (%)              | 18.20 (Ngangyo-Heya, 2016)    | 0            |
| Volátiles (%)            | 86.32 (Funda, 2020)           | 0            |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.13.5. Normalización.

La normalización de los valores de los indicadores se realizó en una escala de 0 a 10, para una mejor interpretación de los resultados, con lo que se espera tener una mayor acotación de los datos. Este método consiste en obtener un dato o valor normalizado un ves multiplicando el valor real por (10) y después dividirlo entre el valor máximo encontrado en la literatura para cada indicador; con lo que se obtendrían cada uno de los valores normalizados:

Fórmula para la normalización:

$$V_{normalizado} = \frac{(ValorReal)(10)}{Valor\ maximo}$$

#### 4.13.6. Grafica radial

Una vez que se recabaron los datos necesarios para llevar a cabo el análisis, se obtuvieron los valores normalizados para cada uno de estos, en una escala ponderada de 0 a 10, para que de esta manera se realice una interpretación más concreta de los parámetros a evaluar y sea las eficaz al momento de dar una propuesta de desarrollo de biocombustibles (Figura 4.10).

Tabla 4.10. Valores normalizados.

| Indicador                | Conos de <i>Pinus</i> spp. | Residuo de <i>Quercus</i> spp. |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Poder calorífico (MJ/Kg) | 10.30                      | 9.32                           |
| Celulosa (%)             | 6.91                       | 7.20                           |
| Hemicelulosa (%)         | 1.01                       | 2.75                           |
| Lignina (%)              | 9.28                       | 5.64                           |
| Humedad (%)              | 2.53                       | 4.46                           |
| Cenizas (%)              | 0.34                       | 0.27                           |
| Volátiles (%)            | 8.30                       | 10.11                          |

Fuente: Elaboración propia.

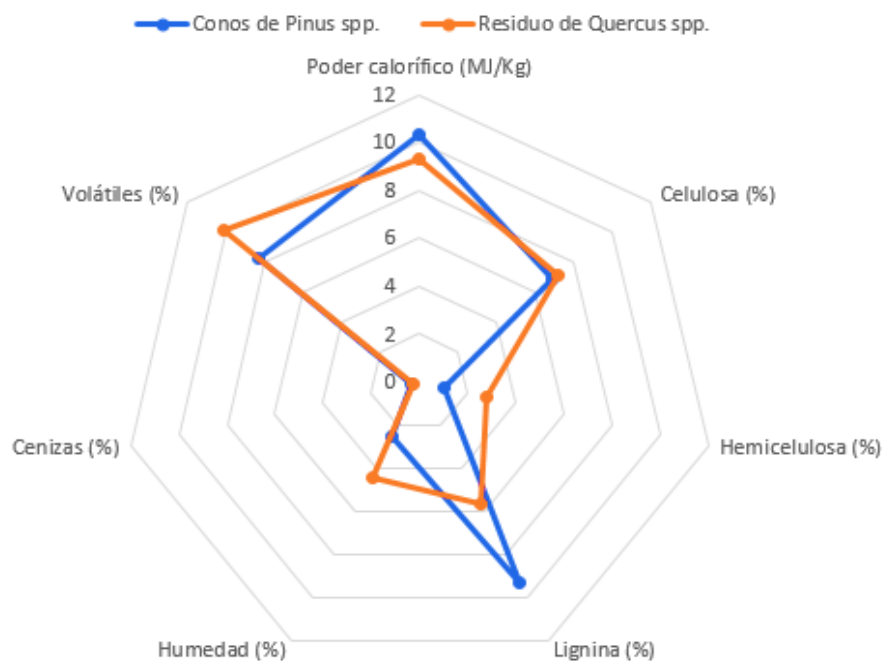


Figura 4.9. Análisis Multicriterio de los conos de pino (*Pinus* spp.).

Se puede denotar que la normalización se desarrolló de excelente manera, ya que los valores obtenidos de ella se representan en la gráfica con un valor máximo de 10, no obstante, en cuanto al poder calorífico, este tiene un ligero excedente.

De acuerdo con (Quiñones, Caracterización proximal de biocombustibles, 2023), en tanto un material lignocelulósico presente un porcentaje de lignina mayor que los demás polímeros (hemicelulosas), este será apto para su implementación como un biocombustible, debido a que la lignina es un polímero fenólico que se encuentra en la pared celular, dando rigidez y a la vez flexibilidad además de soporte estructural.

En tanto al poder calorífico se refiere, de acuerdo a lo establecido por (Parra, 2023) la biomasa lignocelulósica que se encuentra presente en la madera, así como en residuos orgánicos de cultivos tanto agrícolas como forestales, el poder calorífico debe rondar entre los 14 a 23 MJ/Kg, y en nuestro caso, se obtuvo un poder calorífico de **20.73 MJ/kg**, por lo que podemos deducir que es un excelente material adecuado para su utilización como biocombustibles; no obstante aún se tendría que discernir hacia qué tipo de biocombustibles sería más apto orientar este material.

En lo que respecta al porcentaje de humedad, en los materiales lignocelulósicos resulta de gran trascendencia, debido a que con ello también dependen las propiedades energéticas de la biomasa (Ibarra, 2023). El contenido de humedad en materiales lignocelulósicos está influenciado por el agua libre que se encuentra en los poros y capilares, además del agua que se encuentra en la pared celular. Por tal motivo en el territorio mexicano se han establecido rangos de entre 1.59 a 15.91 % de humedad (Rutiaga Quiñones, 2020).

De acuerdo a Rutiaga-Quiñones et al. (2020), en tanto un material lignocelulósico presente un porcentaje de lignina mayor que los demás polímeros (hemicelulosas), este será apto para su implementación como un biocombustible, debido a que la lignina es un polímero fenólico que se encuentra en la pared celular, dando rigidez y ves flexibilidad además de soporte estructural.

#### 4.14. Potencial bioenergético

De acuerdo con los datos obtenidos del muestreo de los conos de pino (*Pinus* spp.), en la comunidad de Pichátaro se podría prever la recolección de alrededor de 1,171.29 toneladas de conos de pino al año (sin un secado previo), esto en la totalidad del área boscosa que es de aproximadamente 4,033.90 de acuerdo con datos obtenidos de la propia comunidad, ya que refieren qué, alrededor de 800 ha se encuentran en programas de reforestación. Aplicando la ecuación 3.1 el potencial energético que puede llegar a tener este residuo biomásico en la comunidad de estudio es de 24,330.0556 TJ/año, lo cual representa un potencial energético considerable para la generación de bioenergía. Analizando estos datos, esto podría suponer que se tendría un ahorro en cuanto al uso de leña como combustible principal, ya que de acuerdo con López-Sosa (2022), las necesidades prioritarias identificadas por consumo energético familiar, se tiene una demanda promedio de 130 GJ/año, por lo representaría un abastecimiento en términos de energía para un gran número de familias promedio dentro de la comunidad, aproximadamente 187.15 hogares.

Casos de estudio en México muestran un potencial energético sobre el uso de la biomasa para el suministro de energía para hoy y las dos décadas por venir, para lo cual se tiene un potencial estimado de biomasa para la producción de energía de 2.228 PJ/año en promedio (Rios & Kaltschmitt, 2013). Otro estudio realizado en México muestra el potencial de bioenergía y costos para la utilización de biomasa leñosa forestal para uso energético en una escala regional, el potencial teórico energético disponible fue de 45.96 PJ para 2013 (Hernández et al., 2017).

Se realizó un análisis de pronóstico para el año 2023, en el cual se calculó un potencial técnico de 60.22 PJ, lo que significa un logro de las metas marcadas por la Nacional Consejo Forestal sobre hectáreas en aprovechamiento sostenible (Flores Hernández et al., 2020). México no es el único país en América Latina que estima su potencial energético de biomasa para suministrar su energía primaria en generar fuentes de energía a través de la biomasa leñosa de residuos forestales.

## CONCLUSIONES

La presente investigación se llevó a cabo en la Comunidad Indígena de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México, específicamente en el bosque del Barrio de San Bartolo Segundo, extrapolando el análisis a la totalidad del área boscosa de la comunidad. De lo anterior y de acuerdo a los resultados obtenidos de la investigación se obtuvieron las conclusiones que a continuación se mencionan:

De acuerdo con Francisco-Arriaga (2011) y datos de la CONAFOR, la comunidad de San Francisco Pichátaro cuenta con una superficie total de 8,484.25 ha, de las cuales se establece que 4,033.90 ha se encuentran en un estado de reforestación, de estas, 3488 ha son arboladas y el resto, es decir 6031 ha corresponde a área no arbolada. Por lo cual la comunidad de estudio aun cuenta con recurso forestal bastante considerable, que es propicio para que se encuentren y recolecten conos de pino (*Pinus* spp).

Los datos obtenidos en el muestreo indican que la mayor cantidad de conos de pino (*Pinus* spp.) encontrados en las áreas boscosas, se encuentran en las áreas más alejadas de la comunidad, en donde quizá esto pueda deberse a la escasa accesibilidad o a que existen mayor cantidad de árboles de pino en comparación con otras regiones.

La disposición de conos de pino (*Pinus* spp.) oscilo entre 21 a 37 unidades por cada 25m<sup>2</sup> esto de acuerdo al muestreo que se realizó, en donde cabe mencionar que, como se dijo anteriormente, existen regiones en donde podemos encontrar una presencia mayor de este recurso, y en otras regiones en donde es más escaso, sin embargo, haciendo un balance y un análisis estadístico se encontró que el promedio de conos de pino (*Pinus* spp.) disponibles por cada 25m<sup>2</sup> es de 28 conos, lo que extrapolándolo a términos de una hectárea, eso representaría 11, 200 conos de pino por hectárea; lo que en términos finales y para realizar un balance general en este sentido, la cantidad aproximada que se obtendrían de conos de pino (*Pinus* spp.) de la totalidad del área boscosa de la comunidad sería de 1,171.29 toneladas de conos de pino anuales, haciendo la pertinente aclaración que sería de esta manera, una vez que se entiende que los conos de pino cumplen un ciclo en su proceso natural de reproducción, y que se estipula su aprovechamiento una vez que has liberado las nuevas semillas, y que por ende se encuentran secas en la superficie del bosque considerándose de esta manera como recurso forestal no maderable.

En cuanto al análisis del contenido de humedad inicial presente en los conos de pino (*Pinus* spp.) recolectados en los bosques de la comunidad de estudio se encontró entre 14.19% a 14.67 % de humedad, siguiendo la norma de estabilización de la humedad, el parámetro encontrado fue de 14.22%, lo cual lo hacen un material apto para la generación de biocombustibles densificados.

Respecto al poder calorífico superior, se determinó que se encuentra en un rango entre 20.73 MJ/kg a 20.79 MJ/kg, el cual es un valor bastante aceptable en cuanto a las especies residuos provenientes de las coníferas de pino (*Pinus* spp.), por lo que se establece que este material al ser catalogado como un residuo no maderable puede formar parte de los elementos principales en la creación de biocombustibles densificados, con la característica de que es un material ambientalmente sustentable.

En cuanto al análisis proximal, para el contenido porcentual de cenizas que se encontraron en las muestras de conos de pino oscilo en un rango de 0.51% a 0.62% por lo cual cumplen con este parámetro de manera confiable. En cuanto al material volátil respecta, cabe mencionar que no varían más del 2%, los rangos en que se encuentran son 1.09% a 1.14%, por lo tanto, el contenido de material volátil para las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.) se encuentra de 71.45% a 72.35% de volatilidad. Por último, el carbono fijo para las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.) se encuentran en un rango entre 26.93% a 27.93%, de esta manera y haciendo una comparativa con trabajos reportados anteriormente resulta menor ya que se han encontrado valores que van desde 48.80% a 50.30%, para muestras del género *Pinus*.

Respecto al análisis químico realizado a las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.), para el caso de la hemicelulosa se obtuvo un promedio de 8.84%, para celulosa fue de 36.88%, para la lignina fue de 40.27%, y 13.24% de extraíbles (otros componentes). De esta manera se establece que, por el alto contenido de lignina presente en el material, su aplicación como biocombustible densificado será viable, pues es uno de los componentes que tiene mayor relevancia en este caso. No obstante que los otros polímeros también aportan cualidades estructurales, por lo que en conjunto hacen de este un excelente material para la fabricación de biocombustibles.

Dentro de los resultados del análisis elemental de las muestras de conos de pino (*Pinus* spp.), el contenido de carbono osciló entre 47.98% y 48.79%, el oxígeno estuvo entre 44.42% y 45.49%, y para el hidrógeno de 5.96% a 6.13%. No obstante, en lo que respecta a los porcentajes de nitrógeno prácticamente se encontraron en bajos niveles, y en donde hubo una inexistencia radical fue en el caso del azufre, donde no se encontraron porcentajes notables que estuvieran presentes.

## **RECOMENDACIONES**

Respecto a los conos de pino (*Pinus* spp.), realizar una evaluación acerca de su extracción, es decir, que cantidad de este material puede ser realmente extraído de los bosques de la comunidad de tal manera que no se afecte la sostenibilidad de estas coníferas.

Realizar una evaluación de manera precisa sobre posibles uniones de este material con otro tipo de residuos orgánicos (ya sean forestales, agrícolas o ganaderas), de tal manera que pudiera ser un elemento principal en la elaboración de biocombustible densificados, aportando su potencial energético significativo

Establecer en la medida de lo posible, la orientación hacia qué tipo de biocombustible sería factible convertir este material; ya sea en briquetas o pellets, para de esta manera llevar a cabo los procesos adecuados bajo un estándar de normatividad.

Se sugiere llevar a cabo una evaluación en campo, es decir establecer el material ya como un biocombustible para su aplicación en una estufa ahorradora de leña para ver realmente el comportamiento que tiene en condiciones no controladas y de esta manera poder llevar a cabo un análisis de la aceptación del usuario final.

Una vez evaluada la pertinencia de extracción de este material de los bosques, sería adecuado analizar los métodos de recolección bajo criterios ambientales que se pudieran seguir con la finalidad de no sobreexplotar este recurso de los bosques.

Llevar a cabo acciones estratégicas para generar el aprovechamiento sostenible de este tipo de materiales y de residuos también, con el fin de generar un impacto en las nuevas formas de generación y uso de biocombustibles de tipo sólido a partir de la biomasa lignocelulósica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ayala, Á. I. (2021). Identificación de nuevas tecnologías para la elaboración de pellets destinados a calefacción. Dispace 32512739009.pdf. (s/f). Recuperado el 14 de junio de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>

Bavera, G. (s/f). Leguminosas como potencial forrajero en la alimentación bovina.

Bennici, S., Jeguirim, M., Limousy, L., Haddad, K., Vaultot, C., Michelin, L., Josien, L., & Zorpas, A. A. (2019). Influence of CO<sub>2</sub> Concentration and Inorganic Species on the Gasification of Lignocellulosic Biomass Derived Chars. *Waste and Biomass Valorization*, 10(12), 3745–3752. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00658-1>

Bernabe-Santiago, R., Avila-Calderon, L. E. A., & Rutiaga-Quinones, J. G. (2013). Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán. *Madera Bosques*, 19(2), 21–35. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192338>

Cardoso Hernández, I., Gouttefanjat, F., Cardoso Hernández, I., & Gouttefanjat, F. (2022). Sustentabilidad, tecnología ambiental y regeneración ecosistémica: Retos y perspectivas para la vida. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(2), 142–157.

Carrera de Ingeniería Acuícola, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú, & Berger, C. (2020). La acuicultura y sus oportunidades para lograr el desarrollo sostenible en el Perú. *South Sustainability*, 1–11. <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-003>

Catalán Alonso, H. (2021). Impacto de las energías renovables en las emisiones de gases efecto invernadero en México. *Problemas del desarrollo*, 52(204), 59–83. <https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2021.204.69611>

Cervantes, B. A., & Torres, M. C. P. (s/f). Sustentabilidad ambiental, del concepto a la práctica.

Chávez-Sifontes, M. (2019). La biomasa – fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. *Anales de Química de la RSEQ*, 115(5), Article 5.

Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(25), 52–63.

Costanza, R., Cumberland, J., Daly, H., Goodland, R., & Norgaard, R. (1997). *An Introduction to Ecological Economics*.

Determinación del contenido de carbono, hidrógeno y nitrógeno (2008)., U.-C. 15104 E. (2008). Métodos instrumentales [Determination of the content of carbon, hydrogen and nitrogen. Instrumental methods].

Diamond, S. (2019). Addressing the imagination gap through STEAMM+D and indigenous knowledge. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 201808679. <https://doi.org/10.1073/pnas.1808679115>

Fernández, J. (1994). La energía de la biomasa. *Ingeniería Industrial*, 0(012), 21–29. <https://doi.org/10.26439/ing.ind1994.n012.2791>

Francisco-Arriaga, F., Guerrero García-Rojas, H. R., Kido-Cruz, A., & Cortés-Zavala, M. T. (2011). Ingreso generado por la recolección de recursos forestales en Pichátaro, Michoacán, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 8(1), 107–117.

García, C., & Masera, O. (2016). Estado del arte de la bioenergía en México.

García, R., González-Vázquez, M. P., Rubiera, F., Pevida, C., & Gil, M. V. (2021). Copelletization of pine sawdust and refused derived fuel (RDF) to high-quality waste-derived pellets. *Journal of Cleaner Production*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129635>

Gaudiano, E. J. G., Meira-Cardona, P. Á., & Martínez-Fernández, y C. N. (2015). Sustentabilidad y Universidad: Retos, ritos y posibles rutas\*. *Revista de la Educación Superior*, 44(175), 69–93. <https://doi.org/10.1016/j.resu.2015.09.002>

Gibbons, L., Cloutier, S., Coseo, P., & Barakat, A. (2018). Regenerative Development as an Integrative Paradigm and Methodology for Landscape Sustainability. *Sustainability*, 10, 1910. <https://doi.org/10.3390/su10061910>

Gorozabel, B. P. L., Reyes, E. R., & Parra, J. C. P. (2022). TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN BIOCOMBUSTIBLE DE SEGUNDA GENERACIÓN: ESTADO DEL ARTE DEL PRETRATAMIENTO. *Revista Bases de la Ciencia*, 7(ESPECIAL), Article ESPECIAL. <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i3.4243>

Haro-Martínez, A. A., & Taddei-Bringas, I. C. (2014). Sustentabilidad y economía: La controversia de la valoración ambiental. *Economía, sociedad y territorio*, 14(46), 743–767.

López-Ridaura, S., Masera, O., & Astier, M. (2000). Evaluating the sustainability of integrated peasantry systems, the MESMIS framework. *LEISA Magazine*, 16(4), 28–30.

López-Sosa, L. B., & Morales-Maximo, M. (2022). Manual de principios sobre vinculación, innovación y diseño para el desarrollo de proyectos ecotecnológicos (A. Millan-Ramirez (Ed.); 1a ed). Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. <https://repositoriouiim.mx/xmlui/handle/123456789/133>

Martínez Romero, A., & Leyva Galán, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el ecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, 35(1), 11–20.

Miyawaki, B., Mariano, A. B., Vargas, J. V. C., Balmant, W., Defrancheschi, A. C., Corrêa, D. O., Santos, B., Selesu, N. F. H., Ordonez, J. C., & Kava, V. M. (2021). Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment. *Renewable Energy*, 163, 1153–1165. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.045>

Moctezuma López, G., Flores, A., Moctezuma López, G., & Flores, A. (2020). Importancia económica del pino (*Pinus* spp.) como recurso natural en México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(60), 161–185. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.720>

Morán, M. (s/f). La Agenda para el Desarrollo Sostenible. Desarrollo Sostenible. Recuperado el 23 de mayo de 2023, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>

Morales-Maximo, M., Castro Sánchez F.J, & Rutiaga-Quinones, J. (2019). Estudio socioeconómico para la evaluación de biocombustibles solidos: eficiencia energética y alterna en la comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México. INTERNATIONAL ENERGY CONFERENCE: IEC, 2(2448–5624), 577–582. [https://www.researchgate.net/publication/341725718\\_Estudio\\_socioeconomico\\_para\\_la\\_evaluacion\\_de\\_biocombustibles\\_solidos\\_eficiencia\\_energetica\\_y\\_alterna\\_en\\_la\\_comunidad\\_de\\_San\\_Francisco\\_Pichataro\\_Michoacan\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/341725718_Estudio_socioeconomico_para_la_evaluacion_de_biocombustibles_solidos_eficiencia_energetica_y_alterna_en_la_comunidad_de_San_Francisco_Pichataro_Michoacan_Mexico)

Morales-Maximo, M., Ruiz-Garcia, V. M., López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quinones, J. (2020). Exploitation of Wood Waste of Pinus spp for Briquette Production: A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. Applied Sciences, 10(8), 2933. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10082933>

Morales-Maximo, M, Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Pintor-Ibarra, L., & Rutiaga-Quinones, J. (2018). Materiales densificados con biomasa forestal como alternativa energética en la comunidad de san francisco Pichátaro, Michoacán, México. Red Mexicana de Bioenergía, XIV, 168–169. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Morales-Maximo, Mario. (2019). Aprovechamiento del aserrín y viruta de pino (Pinus spp) para la producción y evaluación de briquetas, como energía alterna en la comunidad de San francisco Pichátaro, Michoacán [Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo]. In Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2016.17.58151>

Morales-Maximo, Mario, Garcia, C. A., Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Velazquez-Marti, B., & Rutiaga-Quinones, J. G. (2021). Evaluation and characterization of timber residues of pinus spp. as an energy resource for the production of solid biofuels in an indigenous community in Mexico. Forests, 12(8). <https://doi.org/10.3390/f12080977>

Morales-Maximo, Mario, López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quinones, J. G. (2018). Evaluación termografica de la combustión de briquetas con aglomerante variable de residuos maderables de pino: Análisis comparativo en fogones tradicionales del estado de Michoacán. Semana Nacional de Energía Solar, XVLL (2448–5543), 439–444. [https://www.researchgate.net/publication/333561438\\_](https://www.researchgate.net/publication/333561438_)

Morales-Maximo, Mario, & Rutiaga-Quinones, J. G. (2018). Aprovechamiento del aserrín de pino para la producción de briquetas como energía alterna: caracterización térmica y análisis de durabilidad por masa presente en la combustión. *Semana Nacional de Energía, XVLL* (2448–5543), 420–425. [https://www.researchgate.net/publication/340570084\\_](https://www.researchgate.net/publication/340570084_)

Moreno, J. A. O., Cerutti, O. R. M., & Gutiérrez, A. F. F. (s/f). *LA ECOLTA ECECNEONOTMLEOCÉN XGIOÍCALOOEGNÍAMÉXICO*.

Pintor-Ibarra, L. F., Carrilho-Parra, A., Herrera-Bucio, R., & Lopez-Albarran, P. (2017). By-Products from *Pinus Leiophylla*, *P. Montezumae* and *P. Pseudostrobus* for a Bioenergetics Use. *Wood Research*, 62(6), 849–862.

Pintor-Ibarra, L. F., Carrillo-Parra, A., Herrera-Bucio, R., Lopez-Albarran, P., & Rutiaga-Quinones, J. G. (2017). Physical and chemical properties of timber by-products from *pinus leiophylla*, *P. Montezumae* and *P. Pseudostrobus* for a bioenergetics use. *Wood Research*, 62(6), 849–861.

(PDF) Introducción a la economía ambiental | María Del Pilar Zelada Zegarra—Academia.edu. (s/f). Recuperado el 14 de junio de 2023, de [https://www.academia.edu/38621803/Introducci%C3%B3n\\_a\\_la\\_econom%C3%ADa\\_ambiental](https://www.academia.edu/38621803/Introducci%C3%B3n_a_la_econom%C3%ADa_ambiental)

Rahib, Y., Sarh, B., Chaoufi, J., Bonnamy, S., & Elorf, A. (2021). Physicochemical and thermal analysis of argan fruit residues (AFRs) as a new local biomass for bioenergy production. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(5), 2405–2416. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09804-7>

Rios, M., & Kaltschmitt, M. (2013). Bioenergy potential in Mexico-status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3), 239–254. <https://doi.org/10.1007/s13399-013-0085-3>

Rodríguez, A. Á., García, C. P., & Díaz, M. B. F. (s/f). *CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE BIOMASA Y SU RELACIÓN CON EL PODER CALORÍFICO*.

Rodríguez, F. P., & Flores, E. (2022). Desarrollo sostenible desde la educación ambiental en Latinoamérica: Una revisión sistemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), Article 3. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i3.2348](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i3.2348)

Rodríguez, I., & Govea, H. (2006). El discurso del desarrollo sustentable en América Latina. *Revista Venezolana de Economía y Ciencias Sociales*, 12(2), 37–63.

Rodríguez, J. G. (2022). El sector energético mexicano y su futuro con base en energías renovables. *Revista Honoris Causa*, 14(2), Article 2.

Romero, A. M. (2014). Revisión bibliográfica LA BIOMASA DE LOS CULTIVOS EN EL AGROECOSISTEMA. SUS BENEFICIOS AGROECOLÓGICOS. 35(1).

Rutiaga-Quinones, J. G., Pintor-Ibarra, L. F., Orihuela-Equihua, R., González-Ortega, N., Ramirez-Ramirez, A., Carrillo-Parra, A., Carrillo-Ávila, N., Navarrete-Garcia, M. A., Ruiz-Aquino, F., Rangel-Méndez, J. os. R., Hernandez-Solis, J. J., & Lujaán-Alvarez, C. (2020). Characterization of Mexican Waste Biomass Relative to Energy Generation. *BioResources*, 15(4), 8529–8553. <https://doi.org/DOI: 10.15376/biores.15.4.8529-8553>

Spadaro, G. S., Melchor, V. Z. R., & Curiel, M. G. T. (2017). Sustentabilidad E Historia Oral: Huellas En El Tiempo. Conceptos Generadores De Nuevo Conocimiento Para La Acción Ciudadana En El Siglo XXI. *European Scientific Journal, ESJ*, 13(26), Article 26. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n26p374>

The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilisation of Pellets—Ingwald Obernberger, Gerold Thek—Google Libros. (s/f). 2024.

Tauro, R. et al., Ghilardi, Garcia, A., A, C., & Masera, O. (2016). Recursos Biomásicos. In Estado del arte de la bioenergía en México.

Tauro, R., Garcia, C. A., Skutsch, M., & Masera, O. (2018). The potential for sustainablebiomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and marketdemand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(June 2017), 380–389.<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>

Taylor, M. J., Alabdrabalameer, H. A., Michopoulos, A. K., Volpe, R., & Skoulou, V. (2020). Augmented Leaching Pretreatments for Forest Wood Waste and Their E ff ect on

AshComposition and the Lignocellulosic Network. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8(14), 5674–5682. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c00351>

Uzcategui, H. (s/f). UNIVESIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO, VENEZUELA.

Vázquez, A. L. (2015). Desarrollo y perspectivas de energía renovable en México. Economía Informa, 390, 132–135. [https://doi.org/10.1016/S0185-0849\(15\)30010-4](https://doi.org/10.1016/S0185-0849(15)30010-4)

Waisman, H., de Coninck, H., & Rogelj, J. (2019). Key technological rentables for ambitious climate goalsInsights from the IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C. Environmental Research Letters, 14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4c0b>

## ANEXOS

### Anexo 1-A. Datos del muestreo del área boscosa.

| # Muestra | Ubicación Geográfica (Latitud y longitud ) | Numero de conos de pino recolectados |
|-----------|--------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1         | (19.5894000, -101.7950000)                 | 31                                   |
| 2         | (19.591123381491187, -101.79092550769147)  | 43                                   |
| 3         | (19.587974790554632, -101.79023349775785)  | 65                                   |
| 4         | (19.58971334590943, -101.78451502818295)   | 34                                   |
| 5         | (19.589581944120916, -101.78310955064333)  | 45                                   |
| 6         | (19.588399323198207, -101.78245509163632)  | 23                                   |
| 7         | (19.587570472587807, -101.7813822080183)   | 34                                   |
| 8         | (19.59122951263421, -101.78796971343297)   | 45                                   |
| 9         | (19.59003679600885, -101.7870899488662)    | 67                                   |
| 10        | (19.591997698324544, -101.7826911260323)   | 43                                   |
| 11        | (19.5873278813585, -101.78608143826503)    | 34                                   |
| 12        | (19.587145937696384, -101.7837103654692)   | 56                                   |
| 13        | (19.586418160992018, -101.78216541305923)  | 42                                   |
| 14        | (19.586893237824572, -101.78937519097234)  | 26                                   |
| 15        | (19.58616545997808, -101.79426754027052)   | 56                                   |
| 16        | (19.592230174850755, -101.78671443959965)  | 34                                   |
| 17        | (19.591340697632464, -101.78446138400183)  | 57                                   |
| 18        | (19.593321799265038, -101.78308809297076)  | 27                                   |
| 19        | (19.59463578183297, -101.78291643160173)   | 51                                   |
| 20        | (19.595868894144107, -101.78218687074148)  | 58                                   |

Anexo 1-B. Evidencia del muestreó realizado en el bosque del barrio de San Bartolo Segundo



Anexo 2-A. Norma UNE-EN 18134-1:2016 para la determinación de humedad.



### UNE-EN ISO 18134-1:2016

 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia. (ISO 18134-1:2015).

 Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Total moisture - Reference method (ISO 18134-1:2015)

 Biocombustibles solides - Dosage de la teneur en humidité - Méthode de séchage à l'étuve - Partie 1: Humidité totale - Méthode de référence (ISO 18134-1:2015)

URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-18134-1-2023-n0071370>

Anexo 2-B. Norma UNE-EN 17827-1:2024 para la determinación de la granulometría (distribución de partícula).



### UNE-EN ISO 17827-1:2024

 Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir. Parte 1: Método del tamiz oscilante con abertura de malla igual o superior a 3,15 mm. (ISO 17827-1:2024).

 Solid biofuels - Determination of particle size distribution for uncompressed fuels - Part 1: Oscillating screen method using sieves with apertures of 3,15 mm and above (ISO 17827-1:2024)

 Biocombustibles solides - Détermination de la distribution granulométrique des combustibles non comprimés - Partie 1: Méthode au tamis oscillant d'ouverture de maille égale ou supérieure à 3,15 mm (ISO 17827-1:2024)

URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-17827-1-2024-n0073917>

Anexo 2-C. Norma UNE-EN 17828:2016 para la determinación de la densidad a granel.



### UNE-EN ISO 17828:2016

 Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel. (ISO 17828:2015).

 Solid biofuels - Determination of bulk density (ISO 17828:2015)

 Biocombustibles solides - Détermination de la masse volumique apparente (ISO 17828:2015)

URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-17828-2016-n0057270>

Anexo 2-D. Norma UNE-EN 18125:2018 para la determinación del poder calorífico.



## UNE-EN ISO 18125:2018

 Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico. (ISO 18125:2017).

 Solid biofuels - Determination of calorific value (ISO 18125:2017)

 Biocombustibles solides - Détermination du pouvoir calorifique (ISO 18125:2017)

URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-18125-2018-n0060319>

Anexo 2-E. Norma UNE-EN 18122:2023 para la determinación del contenido de ceniza.



## UNE-EN ISO 18122:2023

 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de ceniza. (ISO 18122:2022).

 Solid biofuels - Determination of ash content (ISO 18122:2022)

 Biocombustibles solides - Détermination de la teneur en cendres (ISO 18122:2022)

URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-18122-2023-n0071397>

Anexo 2-F. Norma UNE-EN 18123:2024 para la determinación de materia volátil.



## UNE-EN ISO 18123:2024

 Biocombustibles sólidos. Determinación de materia volátil. (ISO 18123:2023).

 Solid biofuels - Determination of volatile matter (ISO 18123:2023)

 Biocombustibles solides - Détermination des matières volatiles (ISO 18123:2023)

URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-18123-2024-n0072516>

Anexo 2-G. Norma UNE-EN 16948:2015 para la determinación de análisis elemental (CHONS).



### UNE-EN ISO 16948:2015

 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. (ISO 16948:2015).

 Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen (ISO 16948:2015)

 Biocombustibles solides - Détermination de la teneur totale en carbone, hydrogène et azote (ISO 16948:2015)

URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-16948-2015-n0055295>

Anexo 2-H. Norma UNE-EN 16948:2015 para la determinación de carbono fijo.



### UNE-EN 15104:2011

 Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales.

 Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen - Instrumental methods

 Biocombustibles solides - Détermination de la teneur totale en carbone, hydrogène et azote - Méthodes instrumentales

URL: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0048348>