



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO**



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE  
LA TIERRA**

**MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL  
TERRITORIO**

**TÍTULO**

**“VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA DE LOS  
RESIDUOS DE AGUACATE”**

**TÉSIS**

Para obtener el grado académico de:  
Maestro en Geociencias y Planificación del Territorio

Presenta:

**Ing. Navarrete Morales Oscar David**

**Director de tesis: Dr. Otoniel Buenrostro Delgado**

*Morelia, Michoacán, Agosto 2021*

## INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	7
LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS .....	8
RESUMEN .....	9
ABSTRACT .....	10
1.- INTRODUCCIÓN .....	11
2.- MARCO TEÓRICO .....	12
2.1 RELLENO SANITARIO .....	12
2.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).....	14
2.3 APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS .....	16
2.4 INFLUENCIA DE LOS RSU EN EL CAMBIO CLIMÁTICO .....	17
2.4.1 Gases de Efecto Invernadero .....	18
2.5 BIOENERGÍA.....	21
2.6 BIOCOMBUSTIBLES.....	23
2.6.1 Biocombustibles sólidos.....	26
2.6.2 Elaboración de biocombustibles sólidos .....	27
2.6.3 Calidad en los biocombustibles sólidos .....	28
2.7 ESTRATEGIA PARA EXTENDER LA VIDA ÚTIL DEL RELLENO SANITARIO DE LA CIUDAD DE MORELIA.....	29
3.- ANTECEDENTES .....	31
4.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	34
5.- JUSTIFICACIÓN .....	36
6.- HIPÓTESIS .....	38

7.- OBJETIVOS .....	39
7.1 OBJETIVO GENERAL .....	39
7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	39
8.- METODOLOGÍA .....	40
8.1 COLECTA DE LOS RESIDUOS .....	40
8.2 DETERMINACIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO <i>IN SITU</i> . .....	42
8.3 TRASLADO DE LAS MUESTRAS AL LABORATORIO .....	42
8.4 TRITURACIÓN DE LOS RESIDUOS.....	42
8.5 HOMOGENIZACIÓN DE LOS RESIDUOS.....	43
8.6. PRUEBAS DE LABORATORIO CON LOS RESIDUOS HOMOGENIZADOS .....	43
8.6.1 Determinación del Contenido de Humedad .....	44
8.6.2 Determinación de Cenizas .....	44
8.6.3 Determinación de Sólidos Volátiles (SV) .....	45
8.6.4 Determinación de Lignina .....	45
8.6.5 Determinación de Holocelulosa .....	46
8.7 COMPACTADO .....	47
8.8 ELIMINACIÓN DE LA HUMEDAD .....	47
8.9 ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LAS BRIQUETAS.....	48
8.10 ANÁLISIS DE LOS DATOS .....	49
9.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
9.1 COLECTA DE RESIDUOS .....	50
9.2 DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO " <i>IN SITU</i> ".....	50
9.3 TRASLADO AL LABORATORIO.....	52
9.4 TRITURADO DE LOS RESIDUOS. ....	53

9.5 HOMOGENIZADO DE LA MUESTRA ..... 55

9.6 PRUEBAS DE LABORATORIO ..... 56

9.7 COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS ..... 57

9.8 ELIMINACIÓN DE HUMEDAD ..... 61

9.9 ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X..... 61

9.10 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO..... 64

9.11 COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL BIOCOMBUSTIBLE  
ELABORADO CON LA NORMA CEN/TC 343 DEL COMITÉ EUROPEO PARA LA  
ESTANDARIZACIÓN ..... 64

10.- CONCLUSIONES ..... 67

11.- BIBLIOGRAFÍA ..... 68

12.- ANEXOS ..... 79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Municipio de Morelia (INEGI, 2021).....	12
<b>Figura 2:</b> Ubicación del Relleno Sanitario Municipal de Morelia (Google Earth, 2021).....	13
<b>Figura 3</b> Emisiones de metano debido a residuos sólidos. Fuente: (INECC, 2021). .....	21
<b>Figura 4</b> Tratamiento aplicado a los residuos de aguacate .....	40
<b>Figura 5</b> Recolecta de residuos de aguacate .....	41
<b>Figura 6</b> Molino de bolas planetario de la marca Retsch® modelo PM 100 .....	43
<b>Figura 7</b> Residuos de aguacate saliendo de la línea de producción.....	51
<b>Figura 8</b> Recipientes con residuo de aguacate utilizados para prueba de peso volumétrico .....	51
<b>Figura 9</b> Bolsas de residuos de aguacate colocados en hielera para su traslado	53
<b>Figura 10</b> Pesado de las bolsas de residuos de aguacate .....	53
<b>Figura 11</b> Triturado de residuos de aguacate con molino de semillas tradicional	54
<b>Figura 12</b> Capsula, bolas de acero del molino de bolas y material triturado .....	54
<b>Figura 13</b> Diferencia de textura en residuos triturados con molino de semillas (B) y con el molino de bolas (A) .....	55
<b>Figura 14</b> Residuos de aguacate triturados, A) Residuo homogenizado, B) Cáscara + pulpa, C) Semilla. ....	56
<b>Figura 15</b> Compactadora manual (A) y moldes utilizados (B) para elaborar las briquetas.....	59
<b>Figura 16</b> Prensa hidráulica Elvec® (A) y moldes utilizados en la fabricación de briquetas (B).....	60
<b>Figura 17</b> Briquetas elaboradas con la compactadora manual (A) y con la prensa hidráulica (B). ....	60
<b>Figura 18</b> Briquetas en la estufa de secado. ....	61

**Figura 19** Análisis de difracción de rayos X para la cáscara del aguacate. Fuente: (Ayungua Gutierrez, 2020) a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO. .... 62

**Figura 20** Análisis de difracción de rayos X para la semilla del aguacate. Fuente: (Ayungua Gutierrez, 2020) a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO ..... 63

**Figura 21** Análisis de difracción de rayos X para la mezcla del residuo de aguacate. Fuente: (Ayungua Gutierrez, 2020) a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO ..... 63

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Emisiones de GEI debido a residuos 1990-2015. Tomado de (INECC, 2018).....	20
<b>Tabla 2</b> Determinación del peso volumétrico de los residuos de aguacate .....	52
<b>Tabla 3</b> Datos obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas a los residuos de aguacate .....	56
<b>Tabla 4</b> Presiones utilizadas en la elaboración del biocombustible sólido .....	58
<b>Tabla 5</b> Parámetros establecidos por la norma internacional CEN/TC343 para biocombustibles sólidos. ....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

BCS	Biocombustibles Sólidos
CEN	Comité Europeo para la Estandarización
DBGIRS	Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos
DOF	Diario Oficial de la Federación
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INEGYCEI	Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero
LPGGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
NOM	Norma Oficial Mexicana
RCySA	Residuos de Cascara y Semilla de Aguacate
RESA	Rellenos Sanitarios
RME	Residuos de Manejo Espacial
RSO	Residuos Sólidos Orgánicos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SAGARPA	Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación
SDF	Sitios de Disposición Final
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
TCA	Tiraderos a Cielo Abierto



## RESUMEN

Los residuos sólidos generados por la producción de guacamole son la cascara, semilla y una pequeña porción de pulpa del aguacate y por la cantidad generada representa un problema ambiental, ya que son dispuestos en el relleno sanitario de la ciudad de Morelia que ha sido motivo de estudios de impacto ambiental (Israde et al., 2005, Gonzales-Arqueros et al., 2021). En este trabajo se propone la valorización energética de los residuos de aguacate como estrategia para reducir la cantidad de éstos que llegan al relleno sanitario y disminuir la cantidad de gases de efecto invernadero que se producen de la degradación de la materia orgánica. Primeramente, se determinó el peso volumétrico del residuo *in situ* (NMX-AA-19-1985) y con muestras del residuo se elaboraron las briquetas y se determinó por triplicado, parámetros fisicoquímicos: poder calorífico (NMX-AA-33-1985), contenido de humedad (NMX-AA-16-1984), contenido de cenizas (NMX-AA-18-1984), Carbono (NMX-AA-67-1985), Nitrógeno (NMX-AA-24-1984), Oxígeno (NMX-AA-080-1986), Hidrógeno (NMX-AA-068-1986 y NMX-AA-21-1985), azufre (DGN-AA-31-1976), Fósforo (NMX-AA-94-1985) y compuestos lignocelulósicos (Wise et al. 1946; Colín-Urrieta et al. 2007). Se realizó un análisis de difracción de rayos X (DRX) y por último se probaron diferentes fuerzas de compresión para elaborar la briqueta y se compararon las características del biocombustible elaborado con parámetros establecidos en normas internacionales como la CEN/TC343. Entre los principales resultados se determinó una generación de alrededor de 10 mil toneladas anuales de estos residuos, un poder calorífico de 19,000 KJ/Kg de biomasa, un peso volumétrico de 849.47 Kg/m<sup>3</sup>, que permite estimar un ahorro de espacio de 11,000 m<sup>3</sup> de área del relleno al año. El análisis de DRX no detectó elementos inorgánicos, sugiriendo que los residuos de aguacate resultan óptimos para ser valorizados como biocombustible pues se logra disminuir la contaminación y los impactos ambientales de estos residuos al ofrecer una disposición ambientalmente amigable y generar un biocombustible sustituto de combustibles fósiles. Las características del biocombustible sólido elaborado cumplen con los parámetros establecidos en la norma internacional CEN/TC343.

**Palabras clave:** Bioenergía, biocombustibles, briquetas, calorífico, contaminantes.

## ABSTRACT

The solid waste generated by the production of guacamole is the peel, seed and a small portion of avocado pulp and due to the amount generated it represents an environmental problem, due avocado wastes are disposed in the landfill of the city of Morelia. In this work, the energy valorization of avocado waste is proposed as a strategy to reduce the amount disposed in the landfill and reduce the amount of greenhouse gases that are produced from the degradation of organic matter. Firstly, the volumetric weight of the waste was determined *in situ* (NMX-AA-19-1985) and with samples of the residue the briquettes were made and physicochemical parameters were determined in triplicate: calorific value (NMX-AA-33-1985), moisture content (NMX-AA-16-1984), ash content (NMX-AA-18 -1984), Carbon (NMX-AA-67-1985), Nitrogen (NMX-AA-24-1984), Oxygen (NMX-AA-080-1986), Hydrogen (NMX-AA-068-1986 and NMX-AA-21-1985), Sulfur (DGN-AA-31-1976), Phosphorus (NMX-AA-94-1985) and lignocellulosic compounds (Wise et al. 1946; Colín-Urrieta et al. 2007). An X-ray diffraction analysis (XRD) was carried out and finally different compression forces were tested to make the brick, and the characteristics of the biofuel produced with parameters established in international standards such as CEN / TC343 were compared. Among the main results, a generation of around 10 thousand tons per year of these wastes was determined, a calorific value of 19,000 KJ/Kg of biomass, a volumetric weight of 849.47 Kg/m<sup>3</sup>, which allows estimating a space saving of 11,000 m<sup>3</sup> of landfill area per year. The XRD analysis did not detect inorganic elements, suggesting that avocado waste is optimal to be valued as biofuel since it is possible to reduce pollution and the environmental impacts of these wastes by offering an environmentally friendly disposal and generating a biofuel substitute for fossil fuels. The characteristics of the solid biofuel produced comply with the parameters established in the international standard CEN / TC343.

**Keywords:** Bioenergy, biofuels, briquettes, calorific, pollutants

## 1.- INTRODUCCIÓN

El aumento en la generación de residuos sólidos urbanos, asociado al crecimiento en la población, cambio en el estilo de vida y en los hábitos alimenticios, aunado a la falta de responsabilidad de los grandes generadores, de los ciudadanos y de las autoridades, además de los limitados recursos económicos destinados a la creación de nuevas técnicas y tecnologías apropiadas para un correcto manejo y disposición de los residuos en rellenos sanitarios, ocasiona contaminación de suelos agua y aire, provocando enfermedades plagas y fauna nociva (Alonso-Estrada et al, 2014).

El aprovechamiento de los residuos orgánicos ha adquirido una relevante importancia por el acelerado crecimiento urbano, la necesidad de utilizar materias primas no aprovechadas, la urgencia de reducir el consumo de combustibles fósiles y aumentar la capacidad de generar energías limpias (Alonso-Estrada et al, 2014). Reutilizar los residuos sólidos orgánicos generados en las ciudades trae ventajas adicionales, como la extensión del tiempo de vida del relleno sanitario, disminución de lixiviados y descenso de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmosfera.

Como estrategia para reducir la fracción orgánica del relleno sanitario, extender la vida útil del mismo, coadyuvar a la disminución en la concentración de gases de efecto invernadero que promueven el cambio climático, reducir el uso de combustibles fósiles y elevar el uso de biocombustibles para la generación de energía y calor, en el presente trabajo se propone la reutilización y valorización energética de los residuos de aguacate generados por su industrialización, que consisten en cáscara, semilla y pequeña porción de pulpa. Los residuos de aguacate se procesaron para generar briquetas que podrían usarse como biocombustible en hornos tradicionales. Las técnicas en el procesamiento se pensaron para gestionar la totalidad de los residuos generados por la empresa generadora y en un futuro cercano sea posible llevarlas hasta un nivel de industrialización y a nivel municipal. Estas técnicas empleadas son de fácil utilización y con ellas se puede procesar gran cantidad de material en poco tiempo.

## 2.- MARCO TEÓRICO

El municipio de Morelia (ver figura 1) es la capital del Estado de Michoacán de Ocampo, cuenta con una población de 849,053 habitantes (INEGI, 2021), la ciudad se fundó sobre las siete condiciones que debe tener una ciudad formuladas por Platón: se localiza en una loma por donde todas partes se sube y los edificios estén a salvo, que esté descombrada de montes y sierras para que el sol la bañe al salir y los aires purifiquen las inmundicias de la tierra, presenta dos ríos que la abastecen, abundancia de recursos maderables, posee en sus alrededores de grandes áreas de cultivos, que brindan pan, pescado y carne; la única que no tenía era la de ser puerto o tener minas (Valdivias-Aguilar et al, 2021, en prensa).



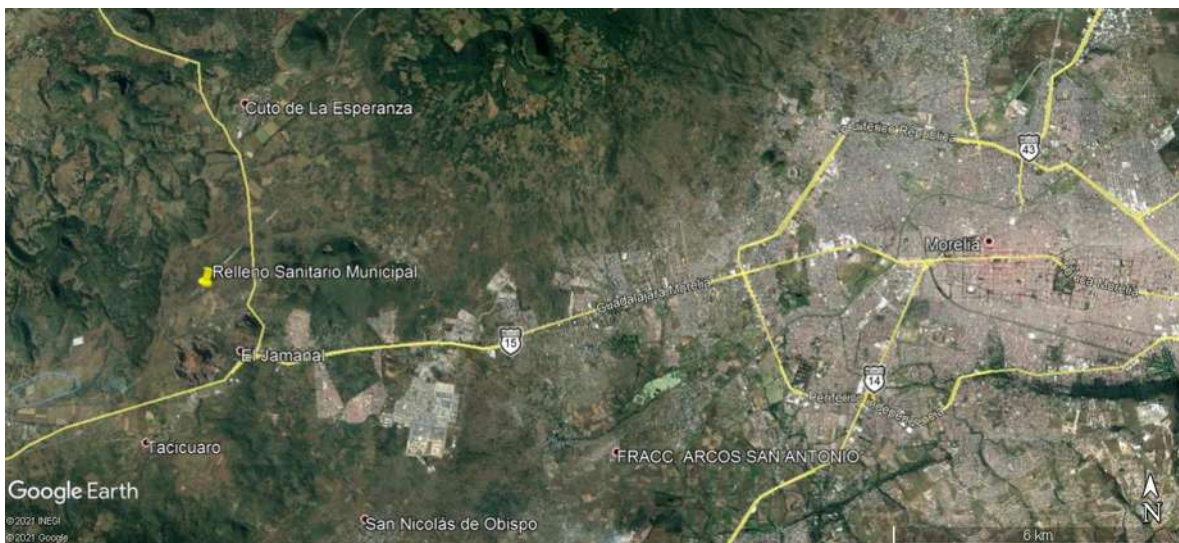
**Figura 1:** Municipio de Morelia (INEGI, 2021).

### 2.1 RELLENO SANITARIO

Se estima que para el 2025 el 63% de la población del mundo vivirá en una ciudad (Agudelo, 2005). En la actualidad la planeación urbana contempla la gestión de residuos y los gobiernos Federal, Estatal y Municipal han creado políticas ambientales para tratar de regular la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) que solo eran arrojados en tiraderos a cielo abierto (TCA) sin ningún tipo de control o monitoreo. Con el fin de garantizar la protección al ambiente, reducir

los efectos de contaminantes, proteger la salud pública y preservar el equilibrio ecológico y los recursos naturales se ha elaborado la Norma Oficial Mexicana número 83, NOM-083-SEMARNAT-2003, (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2004), cuyo objetivo es especificar la selección de un sitio de disposición final de RSU, así como su diseño, construcción, operación, monitoreo y clausura, además de las obras complementarias requeridas para el sitio (SEMARNAT, 2004).

Para la disposición final de los RSU la ciudad de Morelia cuenta con un relleno sanitario ubicado en las coordenadas geográficas de 19°41'49'' de Latitud Norte y 101°21'01'' de Longitud Oeste (Ver Figura 2)



**Figura 2:** Ubicación del Relleno Sanitario Municipal de Morelia (Google Earth, 2021).

De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003 un relleno sanitario se define como una: “*Obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicionales, los impactos ambientales*” (SEMARNAT, 2004). Éste tipo de obras de infraestructura se realizan debido a que se ha excedido la capacidad del medio ambiente de asimilar los residuos generados por la sociedad, esto se debe a factores como el aumento de la

población, el cambio en las actividades de producción y de consumo, así como al aumento en la solicitud de servicios.

La complejidad de los problemas que enfrentan las ciudades como el aumento de la contaminación del aire y agua, el suministro de agua y energía, el manejo de los residuos domésticos e industriales, son temas que requieren la incorporación de nuevos conocimientos para pensar y planificar el desarrollo y la habitabilidad de una ciudad moderna (Agudelo, 2005). Contar con un relleno sanitario que opere correctamente, es indispensable para garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos y prevenir la contaminación de sitios con estos residuos, como lo marca la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).

## 2.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

En México diariamente se generan 102,895 toneladas de RSU, el 78.54% se colocan en sitios de disposición final y solamente el 9.63% se reciclan (SEMARNAT, 2017). En México, de acuerdo con el Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos (DBGIRS) la generación per cápita por habitante es de 0.944 Kg/día, el 46.42% corresponde a residuos orgánicos, el 31.56% de los residuos son susceptibles de aprovechamiento y no hay cifras oficiales sobre la cantidad de residuos que se recuperan mediante la pepena (SEMARNAT, 2020). En el 2012, de los 42.1 millones de toneladas de RSU el 74.39% se confinó en rellenos sanitarios (RESA), solo el 4.99% se recicló y el resto se fue a tiraderos a cielo abierto (Díaz-Archundia et al, 2017). La LGPGIR en su artículo 10 a la letra dice: *“Los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final”*. Esta misma ley establece en su artículo 18 que los RSU se clasifican en orgánicos e inorgánicos.

La fracción orgánica es el principal componente de los RSU y existen diversos estudios que lo establecen, por ejemplo: en el trabajo presentado por Márquez-Benavides et al (2013), en el que se analizan los RSU del relleno sanitario de Patzcuaro Michoacán se obtuvo que la la fracción orgánica constituyó el 72.9%. En el trabajo presentado por Buenrostro-Delgado et al (2015), se reporta que el 83% de los RSU pertenece a la fracción orgánica, estos autores reportan además que, de éstos, el 78% es de origen vegetal. Hernández-Berriel et al (2019) menciona que en México aproximadamente el 66% del total de los RSU pertenece a la fracción orgánica.

La biodegradabilidad de los RSU está íntimamente relacionada con la cantidad de componentes lignocelulóticos (celulosa, hemicelulosa y lignina) (Hernández-Berriel et al, 2019), la biodegradación de la fracción orgánica se lleva a cabo por consorcios de bacterias (Actinobacterias) y hongos (Buenrostro-Delgado et al., 2015). La biodegradación anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) produce biogás. El tiempo para que los RSU comiencen a generar biogás es de seis a ocho meses, el proceso de degradación de los RSU genera lixiviados y biogás que son contaminantes, los lixiviados contaminan el suelo y agua y, el biogás contribuye al calentamiento global, pues contiene principalmente metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que son gases de efecto invernadero (GEI) (Díaz-Archundia, et al., 2017).

Los residuos de manejo especial (RME) son los que se generan en procesos productivos, no tienen las características para ser clasificados como peligrosos o como RSU o son producidos por grandes generadores de RSU. Los RSU y RME que no sean aprovechados o tratados deben confinarse en sitios de disposición final (SDF) (NOM-083-SEMARNAT-2003). Los residuos de aguacate producto de la elaboración de guacamole se pueden clasificar como RME por la gran cantidad generada, de acuerdo a los datos proporcionados por la empresa Empacadora Nacional S.A. de C.V., en el 2017 se produjeron 10,152.27 toneladas de residuos de cascara y semilla de aguacate (RCySA). Esta empresa ha buscado estrategias

para disminuir el impacto al ambiente de sus residuos, es por ello que ha hecho alianzas con terceros para aprovechar dichos residuos, 30 toneladas de residuos de cascará y semilla se llevaron a compostaje con el C. Enrique Ulibarri Dumas y 44 toneladas de semilla se entregó a la empresa Bioplásticos y Polímeros Biofase S.A. de C.V. para su transformación industrial a bioplásticos, las 10,078.27 toneladas de RCySA restantes fueron llevadas al relleno sanitario municipal de Morelia.

### 2.3 APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS

Para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos (RSO) se debe considerar su clasificación, los procedimientos de tratamiento, las propiedades biológicas de los residuos, así como los aspectos sociales y a quien va dirigido. Los RSO pueden ser clasificados según su fuente de generación: pueden provenir de mercados, domicilios (cocina, poda de jardín, papelería), de comercios (desde tiendas, restaurantes), instituciones (comedores, oficinas) y de barridos en zonas públicas. Según su naturaleza puede ser: cuero, plásticos orgánicos, papel y cartón, alimentos, residuos vegetales (legumbres, cascara de frutas), estiércol.

Las propiedades biológicas de los RSO incluyen: contenido de proteínas, solubilidad en agua (azúcares, féculas), celulosa, así como grasas, aceites y ceras. Según su procedimiento de tratamiento pueden ser: reutilizados, reciclados para la producción de bioabonos, biogás, composta, biocombustibles y energía a través de la incineración.

El aprovechamiento de lo RSO debe considerar los aspectos sociales negativos como: la limitada conciencia ciudadana, escaso apoyo a la introducción de tecnologías limpias y la poca o nula responsabilidad del sector productivo.

Se debe considerar a que van a ser dirigidos. Pueden ser encausados a: la alimentación de animales, producción de bocash o compostaje incompleto, a lombricultivos, compostaje, elaboración de biofertilizantes, biocombustibles o fertilizantes foliares. El compostaje: está condicionado por la supervivencia de microorganismos que son los responsables de la transformación del sustrato, y está



condicionado por variables físicas como son la temperatura, humedad, pH, oxígeno, nutrientes y el tamaño de partícula. El compostaje proporciona compost, que si contiene baja concentración de metales pesados es útil para parques y jardines, si contiene sales sirve para la recuperación de suelos y si se encuentra constituido por nutrientes y materia orgánica es útil como abono para cultivos. El lombricultivo genera humus y proteína (de las lombrices), permite la recuperación de suelos, se soporta de la técnica llamada lombricultura que produce lombricompost y proteína para concentrado de animales, en esta técnica se crían lombrices en cautiverio y requieren condiciones ambientales apropiadas como: humedad, oxígeno y alimentación. Los biofertilizantes contienen bacterias fijadoras de nitrógeno, entre las que se encuentran *Rhizobium* y las micorrizas, que aumentan el contenido de nutrientes en el suelo. Los biocombustibles: son combustibles provenientes de biomasa que puede ser de origen animal o vegetal, pueden ser gaseosos como el metano, biogás, biohidrógeno y el syngas; pueden ser líquidos como el biometanol, biodiesel o bioetanol, también llamado alcohol carburante que es el resultado de los procesos de fermentación, hidrólisis de la celulosa y segregación molecular; los biocombustibles también pueden ser sólidos como los pellets, briquetas y el carbón vegetal (Orbes-Calcedo, 2012).

#### 2.4 INFLUENCIA DE LOS RSU EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es uno de los problemas más apremiantes del mundo actual. El efecto de las actividades humanas sobre el clima ha sido amplificado por el aumento de la quema de combustibles fósiles. Tenemos que decidir entre adaptarnos a los cambios correspondientes o tratar de reducir su impacto al reducir la quema de combustibles fósiles (Zidansek, et al, 2008). Sin temor a equivocarse se puede decir que el sistema climático se ha calentado, la atmósfera y el océano han elevado su temperatura, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado (Gay, et al, 2015).

Reducir el uso de combustibles fósiles representa la mayor oportunidad viable para mitigar los efectos en el cambio climático (Zidansek, et al., 2008). Sin embargo, desde el 2008 se han explotado nuevas fuentes de yacimientos de petróleo, como en aguas profundas, arenas bituminosas y de esquisto, al tratarse de hidrocarburos de origen mineral estas fuentes no son compatibles con la disminución de gases de efecto invernadero (GEI) (Jazcilevich, 2014). Se han introducido nuevas tecnologías para responder a la necesidad de utilizar formas más sostenibles de energía, en muchos países el uso de biocombustibles se centra en el etanol y biodiesel (Abreham & Zerga, 2015). Sin embargo, hay muchos obstáculos, entre ellos tecnológicos, que deben resolverse (Zidansek et al., 2008).

#### 2.4.1 Gases de Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) toman su nombre debido a que favorecen el aumento de la temperatura de la atmosfera de la tierra, similar a lo que hacen las paredes de vidrio en los invernaderos, de esa analogía toman su nombre. Los principales GEI son: el vapor de agua ( $H_2O$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el metano ( $CH_4$ ), el óxido nitroso ( $N_2O$ ) y el ozono ( $O_3$ ). A partir de la era industrial las actividades humanas han añadido una mayor cantidad de gases de efecto invernadero a la atmósfera, principalmente por la quema de combustibles fósiles y el cambio de uso de suelo o deforestación (INECC, 2021).

La eliminación de los RSU es uno de los principales problemas ambientales a enfrentar y los vertederos representan el medio más económico y sencillo de eliminación. Sin embargo, se ha demostrado en la práctica que no son la solución definitiva para la gestión de los RSU por los impactos generados en el agua, suelos y aire ya que en su proceso de descomposición generan metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Salmerón-Gallardo, et al., 2017). De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI), que es elaborado y actualizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio

Climático (INECC), el gas más relevante que se emite en nuestro país es el CO<sub>2</sub> que representa el 48% de las emisiones totales, después está el CH<sub>4</sub> con el 19%.

La Estrategia Nacional de Cambio Climático señala que en el 2010 en México se emitieron a la atmósfera gases de efecto invernadero equivalentes a 748 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (Mt CO<sub>2</sub>e), esto representa un aumento del 33 % con respecto a las emisiones de 1990. Las emisiones que mayor crecimiento han tenido son las que provienen de emisiones fugitivas, residuos y transporte, con una tasa media de crecimiento anual entre 1990 y 2010 de 5.3 %, 5.1 % y 4.1 % respectivamente (Gay y Garcia & Rueda Abad, 2015).

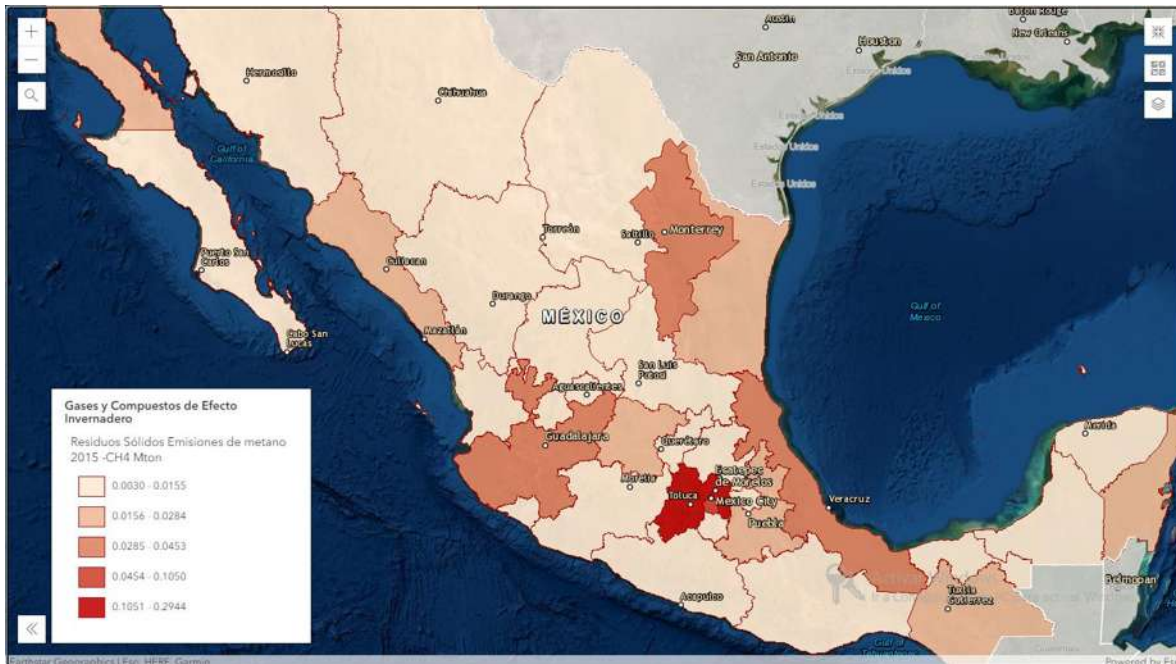
El sector de residuos contribuyó con el 6.6% del total de emisiones derivadas de la descomposición de los residuos, el incremento de las emisiones de GEI es del 256.8% pues pasaron de 12,550.11 Giga gramos (Gg) de CO<sub>2</sub>e (CO<sub>2</sub> equivalente) en 1990 a 45,909.01 Gg de CO<sub>2</sub>e [ $\pm 101.5\%$ ] en 2015 (INECC, 2018). Cabe aclarar que del total de las emisiones de GEI provenientes de los residuos, presentada en el INEGYCEI, las principales emisiones provienen del tratamiento y descargas de aguas residuales, con una participación de 48.6 %, les siguen las emisiones provenientes de la disposición final de residuos con una Contribución del 47.7%, las emisiones por la incineración y quema de residuos a cielo abierto con 3.2%, y el tratamiento biológico con 0.4% (Tabla 1) (INECC, 2018).

**Tabla 1** Emisiones de GEI debido a residuos 1990-2015. Tomado de (INECC, 2018).

Subcategoría	Gg de CO <sub>2</sub> e									
	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
[4A] Disposición final de residuos sólidos urbanos	129.67	2,518.36	5,091.46	8,899.39	15,640.21	16,945.89	18,241.54	19,540.02	20,779.81	21,920.61
[4B] Tratamiento biológico de residuos sólidos	–	163.28	163.29	167.50	208.40	213.44	199.46	199.51	199.46	199.51
[4C] Incineración y quema de residuos a cielo abierto	1,588.60	1,803.62	1,778.68	1,689.50	2,070.14	1,877.10	1,817.96	1,706.16	1,604.99	1,487.15
[4D] Tratamiento y descargas de aguas residuales	10,831.83	14,706.15	16,482.94	17,757.61	22,029.59	22,253.37	22,067.99	22,107.23	21,850.96	22,301.74
Total	12,550.11	19,191.40	23,516.37	28,514.00	39,948.34	41,289.80	42,326.95	43,552.92	44,435.22	45,909.01

En la Tabla 1 se muestran los GEI generados por el sector residuos, que incluyen el tratamiento de descargas residuales, la incineración y quema de residuos a cielo abierto, el tratamiento biológico de la FORSU y la disposición final de los RSU.

El metano (CH<sub>4</sub>) ocupa el segundo lugar de importancia dentro de los GEI; a nivel mundial representa el 14%, a pesar de que es emitido a la atmósfera en cantidades menores al CO<sub>2</sub> su potencial para el calentamiento global es 28 veces mayor. En México se ha observado un incremento en las emisiones de metano, ya que en 1990 se estimó una emisión de 129.6 Gg de CO<sub>2</sub>e, mientras que en 2015 se estimaron 21,920.6 Gg de CO<sub>2</sub>e, siendo esta última cifra aproximadamente 169 veces mayor con respecto a la de 1990. Esta tendencia puede deberse principalmente al incremento de rellenos sanitarios y al aumento en las cantidades de residuos que se disponen en estos sitios de disposición final (INECC, 2018). En la figura 3 se muestra un mapa del territorio mexicano diferenciando por color la cantidad de CH<sub>4</sub> emitidos debido a residuos sólidos por estado.



**Figura 3** Emisiones de metano debido a residuos sólidos. Fuente: (INECC, 2021).

## 2.5 BIOENERGÍA

La bioenergía es energía derivada de la biomasa, que se puede implementar como combustibles sólidos, líquidos y gaseosos para una amplia gama de usos, incluidos el transporte, la calefacción, la producción de electricidad y la cocina (Creutzling, et al., 2015). El cambio climático y las nuevas políticas han alentado el desarrollo y utilización de energías renovables como la bioenergía, o la energía a partir de biocombustibles. Biocombustibles se refiere a los combustibles producidos a partir de la biomasa de plantas y sus productos refinados para ser quemados y producir energía (Guo et al, 2015). La mayoría de los estudios notifican un aumento en la utilización de bioenergía (Abreham & Zerga, 2015). En las últimas dos décadas, el número de plantas de biomasa medianas y pequeñas (menos de 3MW de potencia) ha aumentado exponencialmente en todos los países miembros de la Unión Europea (UE). Las medidas gubernamentales a favor de la bioenergía se justifican por los beneficios ambientales (es decir, la reducción de las emisiones de GEI, la contaminación del aire, la acidificación terrestre, la eutrofización marina y de agua

dulce, el agotamiento del ozono estratosférico y los daños a la salud humana) relacionados con el uso energético de la biomasa en lugar de los combustibles fósiles (Pieratti, et al., 2020).

La combustión directa es el método más eficiente de utilizar la bioenergía (Guo et al., 2015). La principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero de una caldera es el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) producido por la combustión. El uso de biocombustibles ayuda a mantener constantes los niveles de dióxido de carbono, esto es debido a que la vegetación fija el  $\text{CO}_2$  atmosférico durante su crecimiento. El uso de biomasa es considerado una solución que limita el efecto de los gases de efecto invernadero (Perea et al., 2016). Al quemar el biocombustible, el carbono de la biomasa reacciona con el oxígeno del aire para formar dióxido de carbono, el cual se libera a la atmosfera. Si se quemara totalmente, la cantidad de dióxido de carbono producido sería igual a la cantidad tomada de la atmosfera durante la etapa de crecimiento de la planta (Saidur et al., 2011). El Carbono circula la atmósfera, hidrósfera, litosfera y biósfera debido a procesos biogeoquímicos que en su conjunto se denominan "*ciclo del carbono*", el cual explica cómo el  $\text{CO}_2$  es captado de la atmosfera por las plantas y usado para su crecimiento.

Los biocombustibles tradicionales contienen carbono y, por lo tanto, las emisiones de  $\text{CO}_2$  siguen siendo un problema. Sin embargo, con la combustión de biomasa, la cantidad total de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera en principio no aumenta debido a que el  $\text{CO}_2$  liberado fue primero tomado de la atmósfera por la planta y, por lo tanto, solo se devuelve a la atmósfera (Zidansek, et al., 2008); por consiguiente, el uso de bioenergía es ambientalmente amigable ya que se considera como carbono neutral (Pieratti, et al., 2020).

Biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica derivada de la vegetación, contiene principalmente carbohidratos, en ese sentido la biomasa es energía almacenada y esa energía proviene originalmente del sol (Saidur et al., 2011). Tradicionalmente se ha utilizado la biomasa sólida (leña y agro-residuos) como fuente de energía para cocinar, calentar, e incluso para la generación de energía. Los biocombustibles son otra aplicación de la biomasa. Existen muchas fuentes de

biomasa que sirve de materia prima para la producción de biocombustibles, incluyendo cultivos de azúcar, cultivos amiláceos, material celulósico y cultivos oleaginosos (Abreham & Zerga, 2015).

Las tecnologías utilizadas para el aprovechamiento energético de la biomasa sólida en México son en su mayoría ineficientes, aun así, es la mayor fuente de energía renovable en México debido a los usos tradicionales y compone el 59.9% de la energía primaria total obtenida de fuentes renovables. Las acciones para incluir a la biomasa con tecnologías modernas en el sistema energético mexicano son hasta ahora aisladas e insuficientes. La baja prioridad dada a la biomasa en las políticas mexicanas respecto a fuentes renovables contrasta con el alto potencial nacional para producirla sosteniblemente y con la gran variedad de aplicaciones para las que es útil (Riegelhaupt, 2016)

En México la participación de la biomasa en la oferta de energía primaria del año 2013 fue de 4.22%. La mayor parte de esta biomasa (el 2.83%) correspondió a la leña usada en fogones tradicionales para cocción de alimentos, como fuente de calor en pequeñas industrias (ladrilleras, mezcaleras, talleres alfareros) y como materia prima en la producción de carbón vegetal. El segundo lugar lo ocupó el bagazo usado como combustible en los ingenios azucareros (Riegelhaupt, 2016). Al cierre del 2015 la capacidad instalada de generación mediante energías renovables se incrementó 6.6% respecto al periodo año del 2014, llegando a los 17,140.4 MW, lo cual representó el 25.2% de la capacidad de generación total. La mayor parte de la energía renovable en operación continúa siendo generada por hidroeléctricas, que sumada a la energía eólica representan el 80% de la capacidad instalada en energías limpias (Secretaría de Energía, 2016)

## 2.6 BIOCOMBUSTIBLES

Antes del siglo XIX la madera fue el combustible predominante y ha sido utilizada para calentar alojamientos, alumbrar, cocinar y cocer artefactos de arcilla, etc. Hoy en día los combustibles fósiles son la fuente de energía predominante, pero su

decreciente suministro y los altísimos precios, sobre todo del petróleo, obligan al mundo a desarrollar como alternativa las energías renovables. Además, crecientes cantidades de gases de efecto invernadero han sido liberadas a la atmósfera por el consumo de los combustibles fósiles, elevando la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico incrementando los efectos del cambio climático (Guo et al., 2015).

La expansión de cultivos para la producción de biocombustibles líquidos se basa principalmente en cultivos como la caña de azúcar y el maíz para la producción de etanol, así como el aceite de palma, soja y colza para la producción de biodiesel (Abreham & Zerga, 2015). Algunas fuentes de biocombustibles no llenaron las expectativas en cuanto a beneficios ecológicos ya que no se tomaron en cuenta factores como la afectación en la diversidad de especies, competencia con productos agrícolas, gasto de agua y cambio de uso de suelo (Jazcilevich, 2014). Entre los biocombustibles sólidos, las briquetas y los pellets de madera comprimidos tienen una buena perspectiva, ya que no compiten con la producción de alimentos (Zidansek, et al, 2008).

La producción de biocombustibles es una de las alternativas de energía renovable, pueden ser producidos y convertidos en energía en diferentes tipos de plantas de conversión y a diferentes escalas. Existen varios métodos para convertir la biomasa en energía, la principal es la conversión térmica, donde es usada la combustión, gasificación y pirolisis. El siguiente método es la conversión bioquímica donde los microorganismos liberan energía durante la fermentación, digestión anaerobia y esterificación. Otro método es la conversión química donde las reacciones químicas son las encargadas de sacar la energía de la biomasa (Saidur et al., 2011).

Profundizando en lo anterior, para convertir la biomasa en energía se usan principalmente tres procesos: Termo-químico, bio-químico/biológico y extracción mecánica. Dentro de la conversión termo-química están disponibles cuatro procesos: combustión, pirolisis, gasificación y licuefacción. La conversión bioquímica engloba dos opciones: digestión y fermentación (Yilmaz y Selim, 2013). Los biocombustibles han sido desarrollados y se utilizan en tres formas: gaseosos como el biogás y el gas de síntesis (sintegás o syngas); biocombustibles líquidos



por ejemplo bioetanol y biodiesel; y biocombustibles sólidos, que incluyen la leña, astillas de madera, pellets, briquetas y carbón vegetal (Guo et al., 2015).

Uno de los principales argumentos detrás del apoyo a los biocombustibles es la percepción de que son más amigables con el ambiente que el petróleo, dado que, los biocombustibles benefician al medio ambiente al reducir los GEI y la contaminación local, además, ofrecen bajos niveles de emisión de dióxido de carbono, por lo tanto, los biocombustible tienen un enorme potencial de mitigación del cambio climático mediante la sustitución del petróleo (Abreham & Zerga, 2015).

En México se llevan a cabo cientos de proyectos de investigación en materia de biocombustibles, la Red Mexicana de Bioenergía A. C. (REMBIO) en el 2010 dio a conocer una lista de 561 proyectos de los cuales 372 corresponden a biocombustibles (Lina Montes & Álvarez Béjar, 2014). En el año 2012, el gobierno mexicano se comprometió voluntariamente a reducir 30% de sus emisiones de gases de efecto invernadero al 2020. Eso significa que deberán mitigarse 261 Mt CO<sub>2</sub>-eq (Miles de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente) (Gay y Garcia & Rueda Abad, 2015).

Los biocombustibles están subdivididos en cuatro categorías: de primera, segunda, tercera y cuarta generación. Los de primera generación están hechos de azúcar, almidón o aceite vegetal, algunos ejemplos son: bioetanol, biodiesel, bioéter, biogás y madera. Sin embargo, el uso de sus materias primas no es sostenible, o si se usan en grandes cantidades pueden generar grandes impactos en el suministro de alimentos (Yilmaz y Selim, 2013). Los de segunda generación utilizan para su elaboración insumos como residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente por celulosa. Los procesos de producción tienen un nivel de complejidad más alto como la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, para después sintetizar algún combustible líquido como el etanol. Su principal ventaja consiste en que no existen desviaciones de alimentos hacia el sector energético (Álvares Maciel , 2009). Para la elaboración de los combustibles de tercera generación se utilizan insumos vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos

(cultivos energéticos), Las ventajas de estos biocombustibles son el secuestro de anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) para la producción de los insumos, su desventaja es la utilización de tierras de cultivo de alimentos para sembrar los insumos, con excepción de las algas verdes (Álvares Maciel , 2009). Los biocombustibles de cuarta generación son producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$  ) o alguna otra fuente de carbono, dichas bacterias realizan la totalidad del proceso para la obtención de los biocombustibles (Álvares Maciel , 2009).

La producción y utilización intensiva de biocombustibles ha generado grandes impactos sociales, económicos y ambientales. Los impactos socioeconómicos incluyen: derecho de tierras, seguridad alimentaria, seguridad energética, viabilidad económica, prosperidad laboral. Los impactos ambientales se extienden a gases de efecto invernadero, biodiversidad, uso y conservación de suelos y fuentes de agua, así como reducción de contaminantes en el aire. Los impactos varían de acuerdo a la cadena de suministro del biocombustible (Guo et al., 2015).

### 2.6.1 Biocombustibles sólidos

La humanidad ha hecho uso de la biomasa por varios miles de años, el uso directo de la misma sin procesamiento alguno podría constituir una “Generación Cero” de los biocombustibles entre los cuales se pueden mencionar a la leña, la paja de trigo, el rastrojo de otras plantas de cultivo, el estiércol del ganado, y el carbón vegetal. No obstante, es hasta finales del siglo XIX que se comenzó a procesar la biomasa para producir combustibles derivados de la misma (Álvares Maciel , 2009). Los biocombustibles sólidos (BCS) son vectores energéticos obtenidos de la biomasa con mayor o menor grado de transformación física o química y se mantienen en estado sólido hasta su uso final (Riegelhaupt, 2016).

La biomasa es muy difícil de manejar, transportar, almacenar y utilizar en su forma original debido a factores como el alto contenido de humedad, forma y tamaño irregular y baja densidad. La densificación de la biomasa puede abordar estos

problemas y generar productos con forma y tamaño uniforme, más fáciles de manejar y almacenar, reduciendo además los costos asociados con el transporte, manejo y almacenamiento (Karunanithy et al., 2012). La biomasa incluye árboles, residuos agrícolas y forestales, residuos animales y humanos, cultivos energéticos, la fracción orgánica de los residuos municipales, residuos del procesamiento de alimentos, lodos de aguas residuales y lixiviados (Prvulovic et al, 2014).

Riegelhaupt (2016), menciona que la Agencia Internacional de Energía (AEI, por sus siglas en inglés) estima que la bioenergía provee actualmente el 10% del suministro energético global, y que la biomasa será utilizada principalmente como combustible sólido, con una proyección de 5-7 Gt/año para quema directa. También sugiere que se espera obtener biomasa en forma sostenible a partir de residuos, desechos y cultivos energéticos. Además, señala que la biomasa ya es competitiva con los precios de los combustibles fósiles. Para México se estima que en el 2030 la participación de la biomasa será del 22% en la industria, 4% en transporte y 3% en el sector residencial.

#### 2.6.2 Elaboración de biocombustibles sólidos

Los principales procesos de densificación de la biomasa son: empacado, peletizado, extrusión y briquetado. La forma estándar de los pellets es cilíndrica, con un diámetro entre 6 y 8 mm, y longitud no mayor a 38 mm., los pellets con un diámetro mayor a 25 mm se les conoce como “briquetas”, éstas generalmente tienen un diámetro entre 25 y 100 mm con una longitud entre los 25 y 280 mm (Karunanithy et al., 2012). En general, los biocombustibles sólidos son los más favorecidos en cuanto a fuente de materiales, más eficientes en recuperación de energía, en tecnología de conversión y costos de producción (Guo et al, 2015).

Los pellets y las briquetas son biocombustibles densificados, elaborados principalmente a partir de aserrín y residuos forestales, en la actualidad está aumentando el uso de residuos agroindustriales como materia prima. La elaboración incluye los procesos de secado, reducción de tamaño y densificado. El

proceso de peletizado o briquetado mejora las características y facilita su uso, reduce la emisión de polvos en el manejo del combustible, incrementa la densidad aparente, además de que proporciona un control de combustión más eficiente (Prvulovic et al, 2014). Con esto se aumenta su poder calorífico, densidad energética y eficiencia de combustión, se facilita su almacenamiento y manejo, además que se hace viable su transporte a muy largas distancias (incluso transcontinentales) (REMBIO, 2017). Es difícil obtener briquetas con una adecuada fuerza física utilizando solo un compactador de martillo, usualmente un agente aglutinante es mezclado antes de la formación de la briqueta. Los agentes utilizados pueden ser melazas, residuos orgánicos aceitosos y fibrosos, lodos de aceites crudos, aserrín, bitumen, brea, almidón, piedra caliza y dolomita (Punin et al., 2014).

### 2.6.3 Calidad en los biocombustibles sólidos

La identificación y caracterización de la composición química de un combustible sólido es el paso inicial durante la investigación y posterior aplicación de dicho combustible (Saidur et al., 2011). Los indicadores de calidad están divididos en biológicos, químicos y térmicos. Los biológicos son determinados por el tipo, estructura, y tamaño de partícula de la biomasa. Los químicos y térmicos son determinados por el contenido de algunos elementos químicos como carbono, hidrógeno, oxígeno entre otros, contenido de cenizas, humedad, valor energético. Los físicos y mecánicos son los parámetros geométricos, densidad, abrasión y resistencia a la presión (Prvulovic et al., 2014).

La calidad de los combustibles sólidos está directamente relacionada con sus propiedades físicas químicas y mecánicas. Los estándares para la calidad de éstos, desarrolladas por varios países, difieren en sus valores y modo de aplicación. García et al., (2011), exponen en su artículo los diferentes estándares y lineamientos de países como Austria, Suecia, Alemania, Italia y Francia, comparándolas con las del Comité Europeo para la Estandarización (CEN) (García et al., 2011). Un artículo parecido es el de Sabine y Julia (2012) en los que revisan

los estándares de calidad y requerimientos para los combustibles sólidos recuperados (SRF, por sus siglas en inglés). Los SRF son un combustible especialmente preparado, procesado de residuos específicos o de residuos municipales, y deben cumplir con requerimientos de calidad general, que incluyen: valor calorífico predefinido, definición del tamaño y densidad, bajo contenido de metales y disponer de cantidades suficientes para ser eficientemente utilizado (Flamme y Geiping, 2012).

## 2.7 ESTRATEGIA PARA EXTENDER LA VIDA ÚTIL DEL RELLENO SANITARIO DE LA CIUDAD DE MORELIA.

### Aprovechamiento de la FORSU

Es posible determinar la vida útil de un relleno sanitario, en el trabajo presentado por Loayza-Pérez & Silva-Meza (2006), se presentan tres ejemplos y su metodología para cada uno. Disminuir la cantidad de residuos que llegan a un relleno sanitario es una forma de alargar su vida útil. Una de las formas de reducir la cantidad de residuos en el relleno sanitario es el aprovechamiento de los residuos, acciones que se realizan con el objetivo de recuperar el valor económico de los residuos mediante diferentes labores entre las que se encuentran la reutilización, reciclado, recuperación de energía, entre otros (SEMARNAT, 2004). Producir un biocombustible a partir de desechos ofrece doble ventaja: un combustible sustituto, y una disposición ambientalmente amigable de los desechos que no estaban siendo aprovechados. Aprovechar el potencial de los biocombustibles promete viabilidad ecológica, económica y social (Álvarez Béjar & Lina Montes, 2014).

En La ciudad de Morelia, de acuerdo a datos proporcionados por la Dirección de Residuos Sólidos, se generan diariamente alrededor de mil cien toneladas de residuos urbanos (Navarrete-Morales, 2016). De acuerdo con Buenrostro-Delgado et al. (2015), la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) confinados en el tiradero clausurado de Morelia es del 78%. En este trabajo se propuso, como estrategia para reducir los RSU que llegan al relleno sanitario de la ciudad de Morelia, el aprovechamiento de los residuos de aguacate generados por

su industrialización, en específico de la empresa “Empacadora Nacional S.A. de C.V.” los cuales son cáscara, semilla y una pequeña porción de pulpa de aguacate, de esta manera aumentar la vida útil del relleno sanitario. Los residuos fueron convertidos en biocombustibles sólidos (briquetas).

El propósito de convertir agro-residuos en briquetas es sustituir la madera en dispositivos de energía térmica y utilizar los agro-residuos. Los agro-residuos están disponibles en considerables cantidades y pueden ser utilizados como fuentes de energía renovable (Gangil, 2014). El uso final de los BCS es muy diverso e incluye: generación de calor directo e indirecto, generación de vapor, cogeneración de electricidad y calor, refrigeración, fuerza motriz y metalurgia. El uso de biocombustibles no procesados como la leña y el carbón se suele asociar con tecnologías tradicionales, anticuadas y de baja eficiencia, pero esta visión puede ser engañosa, pues en las últimas tres o cuatro décadas han recibido atención creciente como alternativas de bioenergía en aplicaciones modernas y de alta eficiencia (Riegelhaupt, 2016).

### 3.- ANTECEDENTES

Existen diversos estudios en el que se utilizan diferentes biomásas para producir briquetas. Srivastava et al. (2014), investigaron la conversión termoquímica para procesar los residuos de frutas y vegetales y convertirlos en combustible sólido sin utilizar ningún aglutinante; los residuos fueron recolectados, separados, secados, se redujo su tamaño y después fueron briquetados. Los autores concluyen que estos residuos pueden ser transformados en briquetas de buena calidad, con un poder calorífico entre 10.26 a 16.60 MJ/Kg.

En un trabajo realizado en Ghana y publicado en el 2013, se elaboraron briquetas de mazorcas de maíz y *Ceiba pentandra*, a temperatura ambiente y baja presión de compactación, sin aglutinante, para comprobar que la durabilidad y fuerza mecánica de las briquetas hechas de un solo material puede ser mejorada usando como aglutinante biomasa de otro material (Mitchual et al., 2013).

En el municipio de Nuevo San Juan Parangaricutiro en el Estado de Michoacán México, se utilizaron y analizaron residuos de la industria forestal (aserrín y viruta) de varias especies de pino para producir pellets y briquetas. De acuerdo con los resultados, el aserrín es el subproducto más adecuado para la producción de pellets y briquetas (Correa et al., 2014). Un trabajo similar, en el cual se busca el aprovechamiento de residuos como el aserrín y viruta de pino para producir briquetas como energía alternativa, se llevó a cabo en la comunidad de San Francisco Pichataro, Michoacán (Morales-Maximo, 2019).

Sierra Aguilar (2009), utiliza la cascarilla de arroz para producir briquetas como alternativa para sustituir las fuentes de energía contaminantes y no renovables por fuentes de energía renovables y ecológicas, que no contaminen y que sean amigables con el medio ambiente. Ortiz y colaboradores (2003) hacen una revisión de los procesos de transformación física que generan productos de mejor calidad energética, entre los procesos que mencionan está el briquetado y utilizan biomasa forestal para producir elementos densificados (pelets y briquetas). Ulloa (2014), hace un estudio sobre la biomasa forestal de la provincia de Guanacaste en Costa Rica, en dicho trabajo se evalúa la situación actual del uso de la biomasa y se

determina la oferta de biomasa forestal, que resultó en un volumen de 6,700 toneladas anuales. Miranda Caicedo & Amaris Rincón (2009), realizaron un estudio, en Bucaramanga Colombia, en el que analizan el potencial energético de la biomasa residual de la extracción de aceite de palma dada la gran cantidad de residuos producidos, pues solo en el 2006 se generaron 1,607,771.64 toneladas.

Son pocos los estudios que se enfocan en el aprovechamiento de los residuos de aguacate, es decir la cáscara y semilla, Gonzales et al (2015), utilizan ambos (cáscara y semilla) para producir composta que pueda usarse para el mejoramiento de suelos. Ceballos y Montoya (2013), realizaron un trabajo con el objetivo de valorar los componentes de la fibra, carbohidratos solubles, lignina, celulosa y hemicelulosa, en las tres partes del fruto (pulpa, semilla y cáscara), se encontró que los carbohidratos solubles en dos estados de madurez y para las tres variedades usadas variaron entre 12-38% en cáscara, 20-35% en pulpa y 17-35% en la semilla; celulosa y hemicelulosa entre 8-50% en cáscara, 7-26% en pulpa y 1-5% en semilla. Así mismo, se ha estudiado la actividad anti-microbiológica de extractos de semilla y cáscara, donde se reporta que la concentración mínima inhibitoria se encuentra entre los 104.2 a 416.7 µg/ml (Raymond et al., 2010).

Con respecto al uso de la cáscara, piel, exocarpio o epicarpio, según el autor que se lea, existen estudios como el de Rotta et al (2016), en el cual se utiliza la cáscara del aguacate en su forma deshidratada para preparar té, por su contenido de polifenoles y su actividad antioxidante. Palma et al. (2015), propusieron el uso de la cáscara como alternativa de materia prima al carbón activado convencional y mencionan que puede funcionar como adsorbente para remover colorantes como el naphthol azul negro, el reactivo negro 5 y el azul básico 41.

La mayoría de los estudios dedicados al aprovechamiento de residuos de aguacate se enfocan en la semilla. Barbosa et al. (2016), comentan que los subproductos de este fruto subtropical pueden ser usados como aditivos de comida, antioxidantes, antimicrobianos, colorantes, saborizantes y agente espesante. En otro estudio se comprueba que el hueso o semilla del aguacate contiene una gran cantidad de polifenoles extraíbles como la (+) catequina y la (-) epicatequina (Segovia et al.,



2013). Así mismo, se ha reportado que a partir de la semilla de aguacate se puede extraer un colorante natural de color naranja brillante que actualmente no está siendo comercializado (Dabas et al., 2011). Otros autores han reportado el uso de la semilla del aguacate para producir carbón activado capaz de absorber y remover el ion amonio de agua contaminada con este ion (Zhu et al., 2016).

Con respecto al análisis y determinación de la capacidad energética de los residuos de aguacate, autores como Sánchez et al. (2016), investigaron la cantidad de la energía de la semilla de aguacate a través de su transformación termoquímica en un reactor rotatorio, reportaron los resultados obtenidos en el rango de temperatura entre los 150 a 900 °C en los cuales a bajas temperaturas (menores a 275 °C) la composición elemental permanece similar al material en bruto, mientras que con el aumento de la temperatura se produce un progresivo incremento en el contenido de carbón, así como la disminución de oxígeno e hidrógeno; también encontraron un continuo incremento en el contenido de energía de los sólidos producidos de 18.2 a 29.6 MJ/kg para la semilla de aguacate, además de que la carbonización de la semilla de aguacate genera una fracción líquida con un 70-75% de agua y el resto de productos orgánicos. Otros autores que investigaron las propiedades energéticas de la semilla del aguacate reportaron que el contenido de humedad es de 35.2%, el poder calorífico superior es 19.145 MJ/kg y el poder calorífico inferior es de 17.889 MJ/kg, que tiene un 48.01% de contenido de Carbón, 5.755% de Hidrógeno y un 0.447% de Nitrógeno, contiene un 2.86% de cenizas y un 1.715% de contenido de aceites. Con lo que se abren nuevas perspectivas para el uso de estos residuos como combustible para uso industrial o doméstico (Perea et al., 2016).

#### **4.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las áreas urbanas en México se enfrentan a problemas como el crecimiento demográfico, cambio en las actividades productivas, aumento en la demanda de servicios, entre otros. Tener un manejo adecuado de los residuos sólidos urbanos es fundamental no solo para cumplir con lo establecido en la Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR) y con la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004), también para evitar que el relleno sanitario sea clausurado y se tenga que invertir en la infraestructura de establecer un nuevo relleno. Es por eso que se debe aplicar el principio de valorización de los residuos.

Los residuos de cáscara y semilla de aguacate generados por la empresa Empacadora Nacional S.A. de C.V. se pueden clasificar como residuos de manejo especial, por la gran cantidad generada. De acuerdo a datos proporcionados por la empresa, en el año 2017 se generaron en total 10,152.27 toneladas de estos residuos de las cuales 10,078.27 terminaron en el relleno sanitario municipal de Morelia.

México es el mayor productor de aguacate del mundo; en el boletín mensual que emite la Secretaria de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA) se menciona que en 2017 la producción nacional de aguacate fue de un millón 997 mil toneladas, de las cuales un millón 541 mil toneladas (77.2%) son producidas en Michoacán (SAGARPA, 2017). De acuerdo con Gonzales et. al (2014), en el 2008 el 5% de la producción nacional de aguacate se procesó y el 30% del peso total del aguacate es cascara y semilla.

De acuerdo con los datos reportados, para el Estado de Michoacán se estiman 29,955 toneladas de residuos generados por la producción de guacamole en el 2017, de las cuales no se tiene dato alguno de que sean aprovechadas, por lo que se supone que van a parar a basureros y rellenos sanitarios causando problemas de contaminación en los sitios de disposición final. Se considera que la generación de estos residuos irá en aumento si se toma en cuenta que en los últimos 20 años

la producción del aguacate se ha incrementado en 139% (Perea-Moreno et al., 2016).

## 5.- JUSTIFICACIÓN

Las ciudades en nuestra sociedad sufren problemas grandes y complejos. Aparte del transporte, abasto de agua y de alimentos, suministro de servicios y de la inseguridad. Sin embargo, existen otros problemas que no son ni han sido tratados o atendidos como se debiera, tal es el caso de los problemas ambientales producto de la generación de residuos sólidos urbanos. Si bien es cierto que los gobiernos Federal, Estatal y Municipal han creado leyes, reglamentos y normas para satisfacer el derecho humano de crecer en un ambiente sano y establecer como debe ser el sitio de disposición final de los residuos, también es cierto que los gobiernos, los ciudadanos y las instituciones han hecho caso omiso en la parte de aprovechar los residuos, ya que únicamente se recicla cerca del 5% del total de los residuos sólidos urbanos.

Más del 70% de los residuos sólidos urbanos terminan en un relleno sanitario o un tiradero a cielo abierto provocando problemas ambientales, contaminación del agua, el suelo y de la atmósfera. La generación de residuos por las ciudades va en aumento, los sitios de disposición final escasean ya que se tiene que buscar sitios que cumplan con los requisitos establecidos en la legislación ambiental mexicana en materia de gestión de residuos sólidos. En este sentido los científicos tienen como reto encontrar soluciones para el tratamiento de los residuos, proponer líneas de investigación dedicadas a encontrar técnicas y tratamientos para éstos, así como extender la vida útil de los sitios de disposición final.

Como consecuencia del procesamiento del aguacate para elaborar productos como el guacamole se generan cantidades crecientes de residuos compuesto por cáscara, semillas y un poco de pulpa (que queda adherida a la cáscara durante el proceso de elaboración del guacamole) (Alvarez, 2013). De acuerdo con los datos presentados por Gonzales et al (2014) el 30% del peso total del aguacate pertenece a la cáscara y la semilla, Perea et al., reportan que en el 2008 el 5% de la producción nacional total se destinó para su procesamiento (González et al., 2014; Perea et al., 2016).

Se estima que, en el 2017 la producción de aguacate del Estado de Michoacán fue de 1,541,000 toneladas, y se estima que se generaron 23,115 toneladas de residuos de aguacate. Evitar que estos residuos lleguen al relleno sanitario es fundamental para alargar su tiempo de vida útil. Esta cantidad de residuos presenta una oportunidad para desarrollar productos de valor agregado, como briquetas o pellets, para diversas aplicaciones. Así mismo, esta cantidad de residuos precisan de una adecuada gestión para minimizar su impacto ambiental dado que los residuos generados por el procesamiento del aguacate no son utilizados y/o aprovechados. Las tecnologías existentes para tratar la biomasa son muy variadas. En este trabajo se propone un proceso sencillo, fácil y rápido que puede ser usado para convertir los residuos de aguacate en un biocombustible sólido. Principalmente es un proceso donde se reduce el tamaño de la partícula, se extrae la humedad y se densifica para facilitar su manejo y uso.

El reutilizar los residuos generados por el procesamiento industrial del aguacate permitirá extender el tiempo de vida útil del relleno sanitario. Debido a que se evitará que lleguen al relleno sanitario más de 10,000 toneladas de residuos orgánicos al año. Al usar los residuos de aguacate como materia prima se obtienen dos ventajas adicionales, la producción de un biocombustible sustituto de combustibles fósiles, y la disposición ambientalmente más amigable de los desechos.

El aporte más importante de esta investigación es la valorización de esta biomasa, evitando que se convierta en un residuo y con ello, evitar problemas ambientales como la generación de gases de efecto invernadero por la descomposición de éste material orgánico. Al mismo tiempo se generará energía térmica que puede ser utilizada en diferentes procesos para sustituir a la madera como combustible.

que puede ser utilizada en diferentes procesos para sustituir a la madera como combustible

## **6.- HIPÓTESIS**

Los residuos de aguacate derivados del procesamiento de guacamole son factibles de valorizar mediante un proceso de briquetado, ya que poseen las características fisicoquímicas idóneas para utilizarlo como biocombustible. Lo anterior también permitirá que, al valorizarlos se evite la disposición de los mismos en el relleno sanitario municipal de Morelia, incrementando la vida útil de éste y disminuyendo la generación de gases de efecto invernadero provenientes del relleno sanitario.

## **7.- OBJETIVOS**

### **7.1 OBJETIVO GENERAL**

Valorizar los residuos de aguacate derivados del procesamiento de guacamole, mediante la elaboración de un biocombustible sólido.

### **7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Determinar los parámetros físicos químicos y bromatológicos del residuo de aguacate.

Determinar las características físicas, químicas y bromatológicas del biocombustible sólido producido.

Probar diferentes fuerzas de compresión para elaborar la briqueta de residuos de aguacate y comparar las características del biocombustible elaborado con parámetros establecidos en normas internacionales como la CEN/TC343 establecida por el Comité Europeo para la Estandarización.

Determinar el espacio liberado en el relleno sanitario si se utilizan los residuos de aguacate como materia prima para producir el biocombustible sólido.

## 8.- METODOLOGÍA

En la figura 4 se muestra un esquema del proceso de utilización de los residuos de aguacate, la elaboración del biocombustible sólido, la determinación de sus características y posterior comparación.



**Figura 4** Tratamiento aplicado a los residuos de aguacate

### 8.1 COLECTA DE LOS RESIDUOS

Los residuos de aguacate, los cuales son la materia prima para la producción del combustible sólido (briquetas), fueron proporcionados por la empresa “Empacadora Nacional S.A. de C.V.” cuya ubicación es 19°41’46’’ de Latitud norte y 101°12’37’’ de Longitud Oeste.

Los residuos se colectaron directamente de la banda transportadora que sale del área de proceso, se recolectaron tal y como salían, sin hacerles modificación alguna o agregarles nada. Se colocaron en bolsas negras de polietileno de 60 x 90 cm para su posterior traslado.



La Norma Mexicana NMX-AA-15-1985 (SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA, 1992), habla del método de cuarteo para la toma de muestras de los residuos sólidos municipales y, aunque no es específica para residuos agroindustriales, plantea que se deben tomar 10 kg de muestra.

El aguacate que utiliza esta congeladora es: *Persea Americana*, tipo Hass. En la figura 5 se muestran imágenes de la toma de residuos directamente de la banda transportadora que sale del edificio donde está la línea de producción.



**Figura 5** Recolecta de residuos de aguacate

## 8.2 DETERMINACIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO *IN SITU*.

Para realizar esta prueba se recurrió a la norma mexicana NMX-AA-19-1985 (SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA, 1992) que establece el método para determinar el peso volumétrico *In Situ*.

## 8.3 TRASLADO DE LAS MUESTRAS AL LABORATORIO

Los residuos colectados se colocaron en una hielera para evitar su descomposición y posteriormente fueron trasladados al laboratorio donde fueron colocados en un congelador hasta ser utilizados y procesados para elaborar el biocombustible y realizar pruebas de laboratorio por triplicado.

## 8.4 TRITURACIÓN DE LOS RESIDUOS

La reducción de tamaño de los residuos de aguacate se realizó por separado (cáscara con residuos de pulpa y las semillas aparte) en un molino estrella para granos, manual, de la marca “El rey”, posteriormente se utilizó un molino de bolas planetario, de alta, media y baja resistencia marca Retsch® modelo PM 100 (figura 6), 300 rpm durante 30 minutos.



**Figura 6** Molino de bolas planetario de la marca Retsch® modelo PM 100

## 8.5 HOMOGENIZACIÓN DE LOS RESIDUOS

De acuerdo a la Norma Mexicana NMX- AA-52-1985 (SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA., 1992), se realizaron los pasos para la preparación de las muestras de residuos para el laboratorio. Los agro residuos se prepararon para los análisis de laboratorio de acuerdo a la norma arriba mencionada. Los residuos fueron divididos en dos fracciones, una fracción de los residuos fue utilizada para llevar a cabo los análisis fisicoquímicos y la otra fracción fue utilizada para realizar las pruebas de compresión para elaborar las briquetas.

## 8.6. PRUEBAS DE LABORATORIO CON LOS RESIDUOS HOMOGENIZADOS

Para secar la muestra, el kilogramo separado de los residuos triturados se colocó en un horno a 60°C durante 24 hrs., para obtener un producto seco. El resto de los

residuos triturados se usaron para la producción de las briquetas. A continuación, se enumeran las pruebas de laboratorio llevadas a cabo con la mezcla homogénea. Los análisis fisicoquímicos se efectuaron por triplicado.

#### 8.6.1 Determinación del Contenido de Humedad

Se efectuó de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-016-1984 (SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA, 1992), el método se basa en la pérdida de peso de la muestra por la evaporación del agua a una temperatura de 105°C durante 24 horas. El porcentaje de humedad se calculó a través de la siguiente ecuación.

$$H = \left[ \frac{G-G1}{G} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

H: Humedad en %.

G: Peso de la muestra húmeda en g.

G1: Peso de la muestra seca en g.

#### 8.6.2 Determinación de Cenizas

Esta determinación se llevó a cabo con la Norma Mexicana NMX-AA-018-1984, con la muestra producto de la determinación de humedad, en donde se pusieron pesos conocidos de muestra en las cápsulas y se colocaron en la mufla a 550°C durante 5 horas, las muestras se pusieron en la estufa a 105°C durante una hora, después se colocaron en el desecador y ya fríos, se pesaron. A través de la siguiente ecuación se determinaron las cenizas:

$$C = (G1 * 100)/G \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

C: Cenizas en %.

G: Peso de la muestra en g.

G1: Peso de cenizas en g.

### 8.6.3 Determinación de Sólidos Volátiles (SV)

Los SV se determinaron de acuerdo con la técnica 2540G del Standard Methods (Standard Methods, 1989). Con base en los resultados de humedad y cenizas, se realizaron los cálculos para determinar el porcentaje de SV. El porcentaje de SV se determinó con la siguiente ecuación 3:

$$\%SV = \left[ \frac{PS-PC}{PS} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

%SV: Porcentaje de sólidos volátiles.

PS: Peso en gramos de la muestra seca (105°C).

PC: Peso en gramos de la muestra calcinada (505°C).

### 8.6.4 Determinación de Lignina

La determinación de lignina en las muestras de los residuos se efectuó de acuerdo con el método reportado por Colín-Urieta *et al.* (2007), estos análisis se realizaron por duplicado para cada tipo de muestra: semilla, cáscara y mezcla.

El porcentaje de lignina en la muestra, se determinó a partir de la siguiente ecuación (Ecuación 4).

$$\%Lig = \left[ \frac{(Pr-Pf)-(Mc-Pc)}{M} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

%Lig: Porcentaje de lignina base seca.

M: Muestra de residuo desengrasado y seco.

Pr: Peso del filtro con residuo.

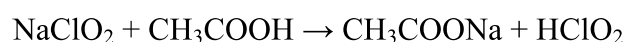
Pf: Peso del filtro.

Pc: Peso del crisol.

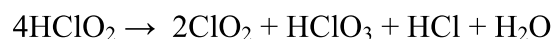
Mc: Peso del crisol con la muestra del residuo calcinado.

### 8.6.5 Determinación de Holocelulosa

La determinación de holocelulosa en las muestras, se realizó con el método de clorito (Wise *et al.*, 1946). Basándose en la acción del dióxido de cloro, donde sus productos de reacción acuosa y caliente permiten que la lignina se separe en forma soluble. El dióxido de cloro se produce al mezclar clorito de sodio y ácido acético, como se muestra en la ecuación 5.



**Ecuación 5**



El contenido de holocelulosa se calculó a partir de la Ecuación 6.

$$\%Hol = \left[ \frac{(P_3 - P_2) \times (100 - \%HHol_2) \times (\%HHol_1)}{P_1 \times (100 - \%Hbh)} \right]$$

**Ecuación 6**

Donde:

%Hbh: Porcentaje de agua con respecto a la muestra inicial molida.

P<sub>1</sub>: Peso de la muestra libre de extraíbles y seca.

P<sub>2</sub>: Peso de la muestra separada, lavada con H<sub>2</sub>O caliente.

P<sub>3</sub>: Peso de la muestra seca durante tres días en horno.

%HHol<sub>1</sub>: Porcentaje de humedad de la muestra diferida libre de extraíbles.

%HHol<sub>2</sub>: Porcentaje de humedad del sólido obtenido en el filtro Gooch.

## 8.7 COMPACTADO

Los residuos de aguacate, previamente triturados y mezclados hasta quedar homogéneos, fueron compactados utilizando una compactadora manual de fabricación propia y sin usar ningún emulsionante o aglutinante. Para realizar el compactado de los residuos se utilizaron moldes de acero de 8 y 10 cm de diámetro, se llenó el recipiente con los residuos de aguacate triturados y se colocaron en la briquetadora, posteriormente se colocó el embolo (pistón) en el recipiente perforado y se aplicó la mayor presión posible con la palanca sobre el embolo y por último se retiró el material compactado del recipiente perforado.

En el trabajo de Balseca et al., (2018) se reporta que la presión adecuada para obtener una briqueta cilíndrica maciza es de 2,77 MPa (mega pascales), por lo tanto, se realizó la prueba de compactación utilizando una prensa hidráulica de la marca “Elvec”, se aplicaron cargas de mil y 2 mil kg. Los moldes utilizados para compactar con la prensa hidráulica fueron de mayor resistencia y tamaño, el diámetro de los mismos es de 8 cm y de largo de 12.5, 12.9 y 13.5 cm.

## 8.8 ELIMINACIÓN DE LA HUMEDAD

Una vez compactados los residuos se colocaron en un horno o estufa a 60°C durante 24 horas para eliminar el exceso de humedad; de acuerdo con Avhad y Marchetti, (2015), es la temperatura y el tiempo necesario para obtener un óptimo y

satisfactorio secado. Una vez elaboradas las briquetas se procedió a la determinación de sus características como combustible.

## 8.9 ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LAS BRIQUETAS

Para éstas pruebas la elección de las briquetas para determinar sus características se hizo al azar.

Para conocer la composición química del combustible se realizó la determinación de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre y Fosforo, para la determinación del nitrógeno total se utilizó la norma NMX-AA-24-1984 (SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA, 1992), para determinar el hidrógeno se usó la norma NMX-AA-068-1986 (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 1986) que a su vez requiere la aplicación de la norma NMX-AA-21-1985 (SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA, 1992) ya que el hidrógeno se calcula a partir de la determinación de materia orgánica. Para determinar el oxígeno se utilizó la norma NMX-AA-080-1986 (SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, 1986), para el azufre se recurrió a la norma mexicana DGN-AA-31-1976 (Secretaría de Industria y Comercio, 1976), para determinar el fosforo total se usó la norma NMX-AA-94-1985 (SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, 1992) y para el cloro la NMX-AA-073-SCFI-2001 (Secretaría de Economía, 2001).

En la determinación del poder calorífico se utilizó la norma mexicana NMX-AA-33-1985 (SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA, 1992), esta Norma Mexicana especifica un método de prueba para determinar el poder calorífico superior de los residuos sólidos urbanos, empleando una bomba calorimétrica. En dicha norma se especifica el uso de una bomba calorimétrica en la cual se coloca un gramo de la muestra del combustible, se hace pasar un alambre que servirá para la ignición del material, se introduce oxígeno en la cámara y se procede con la prueba.



## 8.10 ANÁLISIS DE LOS DATOS

Para realizar el análisis de los datos, todas las pruebas de laboratorio y las determinaciones se hicieron por triplicado. Los resultados obtenidos se analizaron con estadística descriptiva y posteriormente se compararon los resultados obtenidos con los parámetros establecidos en la norma internacional CEN/TC343 establecida por el Comité Europeo para la Estandarización (Flamme & Geiping, 2012).

## 9.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 9.1 COLECTA DE RESIDUOS

Se recolectaron 7 bolsas de residuo que fueron trasladadas al laboratorio y pesadas en el mismo.

De acuerdo con los datos presentados por Gonzales et al (2015), el 30% del peso total del aguacate pertenece a la cáscara y la semilla, Perea et al reportan que en el 2008 el 5% de la producción nacional de aguacate se destinó para ser procesado (González *et al.*, 2015; Perea *et al.*, 2016). En el 2017 la producción nacional de aguacate fue de un millón 997 mil toneladas. La entidad líder en la producción nacional es el Estado de Michoacán de Ocampo con el 77.2% (Un millón 541 mil toneladas) (SAGARPA, 2018). Se calcula, con los datos anteriores, la cantidad de residuos generados por la producción de guacamole, (al 5% de la producción del Estado se le resta el 30%) se obtienen 29,955 toneladas de residuos de aguacate. Sin embargo, se deben considerar los datos proporcionados por la empresa Empacadora Nacional S.A. de C.V., la cual reporta que en el año 2017 generaron en total 10,152.27 toneladas de residuos de aguacate. Esta empresa, sola, genera casi la mitad de los residuos de aguacate que fueron estimados. Además, se debe de considerar que, en el Directorio de empacadoras de aguacate, mercado nacional y de exportación, elaborado por la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA), se encuentran registradas 58 empresas para el Estado de Michoacán. Por lo tanto, los datos estimados con respecto a la generación de residuos de aguacate quedan muy por debajo de la realidad, con lo que trabajos como éste aportan en la actualización de los datos.

### 9.2 DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO “*IN SITU*”

En la figura 7 se muestran los residuos de aguacate saliendo de la línea de producción, los resultados de la determinación del peso volumétrico se muestran en la tabla 2. El promedio del peso volumétrico de los residuos de aguacate es de 849.47 Kg/m<sup>3</sup>, para calcular el volumen de los recipientes se utilizaron las

operaciones aritméticas tradicionales ( $(\pi)(r^2)(h)= V$ ; donde  $r$  es el radio, y  $h$  es la altura del recipiente,  $V$  es el volumen obtenido), en la figura 8 se muestran los recipientes, llenos de residuo de aguacate, utilizados para la prueba de peso volumétrico.



**Figura 7** Residuos de aguacate saliendo de la línea de producción



**Figura 8** Recipientes con residuo de aguacate utilizados para prueba de peso volumétrico

**Tabla 2** Determinación del peso volumétrico de los residuos de aguacate**PESO VOLUMÉTRICO**

RECIPIENTE	CAPACIDAD (Volumen m <sup>3</sup> )	PESO DEL RECIPIENTE (kg)	PESO BRUTO (kg) (PR con residuo)	PESO NETO (kg) (PB-PR)	PESO VOLUMÉTRICO kg/m <sup>3</sup> (PN/V)
1	0.017757831	1.05	16.5	15.45	870.038
2	0.01815621	1.07	16.5	15.43	849.846
3	0.018635657	1.06	16.5	15.44	828.519
				PROMEDIO	<b>849.468</b>

El 13 de octubre del 2019 se inauguró la quinta celda del relleno sanitario de Morelia con una capacidad para recibir 700 mil toneladas de residuos sólidos urbanos durante 2.5 años. El relleno actual inició operaciones en el 2007 con una extensión de 35 hectáreas, cuenta con 4 celdas y un volumen de 4.5 millones de toneladas recibidas de residuos sólidos urbanos (RSU) (Hernández, 2019). Con el resultado obtenido del peso volumétrico se calculó el espacio en metros cúbicos que se evitaría utilizar en el relleno sanitario municipal de Morelia si se utilizan las 10,078 toneladas de residuos de aguacate generados por la empresa como materia prima para elaborar biocombustibles sólidos, para realizar éste cálculo se dividen las toneladas de residuos generadas entre el promedio del peso volumétrico obtenido, como resultado se obtiene que el espacio de celda liberado sería de 11,863.89 m<sup>3</sup> anuales. Con éste dato, y tomando en cuenta que en la ciudad de Morelia se generan alrededor de mil toneladas diarias de RSU, podemos decir que se extendería aproximadamente 11 días por año la vida útil del relleno sanitario.

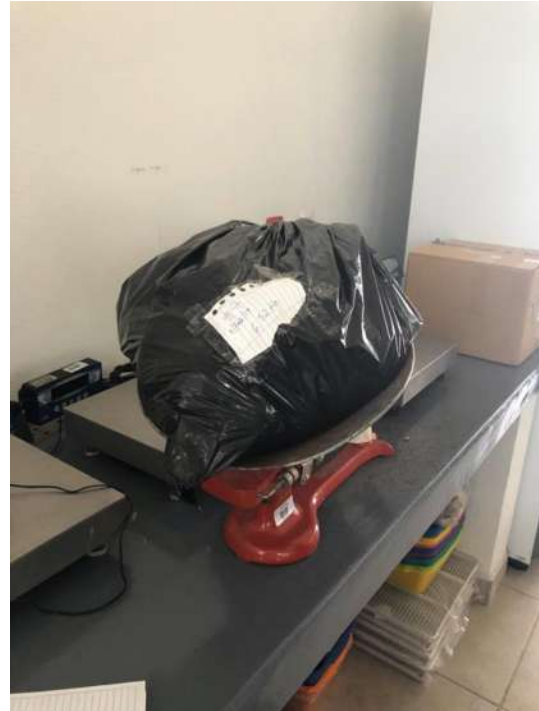
### 9.3 TRASLADO AL LABORATORIO

Se recolectaron siete bolsas con residuos de aguacate. Las 7 bolsas recolectadas se colocaron en una hielera para ser transportadas, en la figura 9 se observan las bolsas de residuos de aguacate colocados en hielera listas para su traslado al

laboratorio donde fueron pesadas (figura 10), se obtuvieron las siguientes cantidades en kilogramos (Kg): 1) 6.09, 2) 8.5, 3) 7.35, 4) 6.92, 5) 7.91, 6) 4.11 y 7) 6.52, en total fueron 47.4 Kg de residuos recolectados.



**Figura 9** Bolsas de residuos de aguacate colocados en hielera para su traslado



**Figura 10** Pesado de las bolsas de residuos de aguacate

#### 9.4 TRITURADO DE LOS RESIDUOS.

Los residuos fueron triturados por separado utilizando el molino tradicional para semillas (Figura 11), se molió por separado la cascara que es la que contenía una pequeña porción de pulpa, posteriormente se molió la semilla la cual tuvo primero que ser quebrada debido a que la semilla del aguacate es muy grande para pasar por el molino, se utilizaron diferentes herramientas como martillo o pinzas, siendo éstas últimas las más utilizadas por su facilidad y rapidez con la que se podía romper la semilla. Además, se utilizó un molino de bolas planetario de la marca Retsch®

modelo PM 100, para que los residuos quedaran más finamente molidos (figura 12), los residuos que se utilizaron en este molino ya habían sido procesados con el molino de estrella arriba mencionado, en la figura 13 se observa la diferencia en la textura del residuo molido con los dos diferentes molinos.



**Figura 11** Triturado de residuos de aguacate con molino de semillas tradicional



**Figura 12** Capsula, bolas de acero del molino de bolas y material triturado



**Figura 13** Diferencia de textura en residuos triturados con molino de semillas (B) y con el molino de bolas (A)

### 9.5 HOMOGENIZADO DE LA MUESTRA

Debido a que los residuos tuvieron que ser triturados por separado se requirió mezclar la cáscara, semilla y pulpa hasta dejar una masa homogénea y a partir de ésta realizar las pruebas de laboratorio necesarias, en la figura 14 se muestra la mezcla homogénea (A), la cáscara molida con la pulpa (B) y la semilla molida (C).



**Figura 14** Residuos de aguacate triturados, A) Residuo homogenizado, B) Cáscara + pulpa, C) Semilla.

### 9.6 PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio se realizaron con el fin de conocer las características fisicoquímicas del residuo de aguacate y poder compararlas con los parámetros establecidos por normas internacionales, en específico la CEN/TC343 establecida por el Comité Europeo para la Estandarización (CEN). A continuación, en la tabla 3 se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio realizada a los residuos de aguacate.

**Tabla 3** Datos obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas a los residuos de aguacate

**Composición química de los residuos de aguacate**

<b>Parámetro</b>	<b>Determinación 1</b>	<b>Determinación 2</b>	<b>Determinación 3</b>	<b>Promedio</b>
<i>Humedad total %</i>	70.79	70.05	73.36	71.40
<i>Materia seca %</i>	29.21	29.95	26.64	28.60



<i>Cenizas totales %</i>	3.69	3.03	3.86	3.53
<i>Nitrógeno total %</i>	0.93	0.91	0.93	0.92
<i>Proteína bruta %</i>	5.81	5.68	5.81	5.77
<i>Grasa Total %</i>	4.24	3.31	10.14	5.90
<i>Fibra bruta %</i>	53.4	49.9	57.13	53.48
<i>Fósforo %</i>	0.06	0.02	0.06	0.05
<i>Calcio %</i>	0.03	0.26	0.01	0.10
<i>Magnesio %</i>	0.03	0.06	0.03	0.04
<i>Potasio %</i>	0.46	0.59	0.59	0.55
<i>Sodio %</i>	0	0.01	0.01	0.01
<i>Hierro ppm</i>	67.8	38.25	65.3	57.12
<i>Manganeso ppm</i>	3.13	2.36	0.33	1.94
<i>Zinc ppm</i>	13.68	13.05	12.38	13.04
<i>Cobre ppm</i>	2.78	7.92	4.88	5.19

## 9.7 COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS

La compactación de los residuos triturados y homogenizados de aguacate es una parte en el proceso de elaboración de las briquetas muy importante, del compactado del material depende la solidez de la briqueta. En este proyecto no se utilizó ningún aglutinante en la elaboración de las briquetas debido a que se tomó en cuenta lo dicho por Gangil, a saber: “Los biopolímeros constituyentes de los residuos tomarán parte en el proceso de aglutinación, la lignina presente en el residuo experimentará estrés durante el proceso de briquetado y actuara como pegamento para enlazar los diferentes componentes del biomaterial” (Gangil, 2014). Sin embargo, esto no ocurrió y las briquetas no tuvieron la consistencia necesaria para mantenerse sólidas, se desmoronaban al ser manipuladas. Hay que aclarar que para éste proceso no se contó con una máquina briquetadora para elaborar el biocombustible, esto también afectó la solidez final de las briquetas.

En primera instancia se utilizó una compactadora manual de diseño y elaboración propia (figura 15), debido a que no se obtuvo en las briquetas la solidez buscada se recurrió a la prensa hidráulica para el proceso de compactación. Sin embargo, tampoco se obtuvo una briketa sólida que pudiera ser manipulada sin desmoronarse, ni aun cuando se trituró el material con un molino de bolas y después se compactó con prensa hidráulica utilizando diferentes cargas se obtuvo la consistencia requerida, en la figura 16-A y 16 B se observa la prensa hidráulica y los moldes utilizados en esa prensa, respectivamente. En la tabla 4 se mencionan las diferentes fuerzas de carga aplicadas por la prensa hidráulica para elaborar las briquetas. Las pruebas realizadas con la prensa hidráulica se realizaron en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

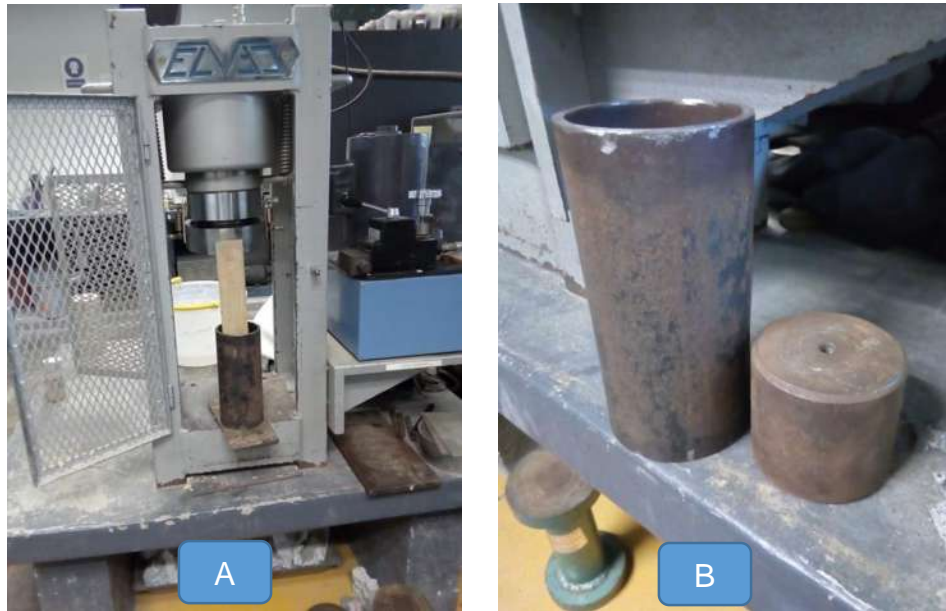
**Tabla 4** Presiones utilizadas en la elaboración del biocombustible sólido

<b>Método</b>	<b>Fuerza aplicada (Kg de presión )</b>	<b>Número de briketa</b>	<b>Resultado</b>
<b>Prensa manual</b>	N/A	12 briketas	Poca solidez
<b>Prensa hidráulica</b>	500	1	No se mantiene sólida
<b>Prensa hidráulica</b>	1030	1	Se mantiene sólida, se desmorona al manipularse
<b>Prensa hidráulica</b>	1000	1	Se mantiene sólida, se desmorona al manipularse
<b>Prensa hidráulica</b>	1010	1	Se mantiene sólida, se desmorona al manipularse
<b>Prensa hidráulica</b>	1040	1	Se mantiene sólida, se desmorona al manipularse
<b>Prensa hidráulica</b>	1760	1	Se mantiene sólida, se desmorona al manipularse
<b>Prensa hidráulica</b>	2010	1	Se mantiene sólida, se desmorona al manipularse
<b>Prensa hidráulica</b>	2020	1	Se mantiene sólida, se desmorona al manipularse
<b>Prensa hidráulica</b>	2110	1	Se mantiene sólida, se desmorona al manipularse

Cabe aclarar que, si bien existe maquinaria especializada para la elaboración de biocombustibles sólidos (briquetadoras y peletizadoras) no se utilizó ninguno de éstos equipos, además, los residuos de aguacate al llegar al laboratorio fueron congelados, lo que podría influir en el proceso de compactación ya que el material se sentía menos pastoso después de ser descongelado. En la figura 17 se muestran las briquetas elaboradas con la compactadora manual (A) y las elaboradas con la prensa hidráulica (B).



**Figura 15** Compactadora manual (A) y moldes utilizados (B) para elaborar las briquetas



**Figura 16** Prensa hidráulica Elvec® (A) y moldes utilizados en la fabricación de briquetas (B).



**Figura 17** Briquetas elaboradas con la compactadora manual (A) y con la prensa hidráulica (B).

## 9.8 ELIMINACIÓN DE HUMEDAD

Parte de la humedad que contienen los residuos se eliminó de manera mecánica con el proceso de compactado, el resto de la humedad se eliminó colocando las briquetas en una estufa a 60° centígrados durante 24 horas (ver figura 18).

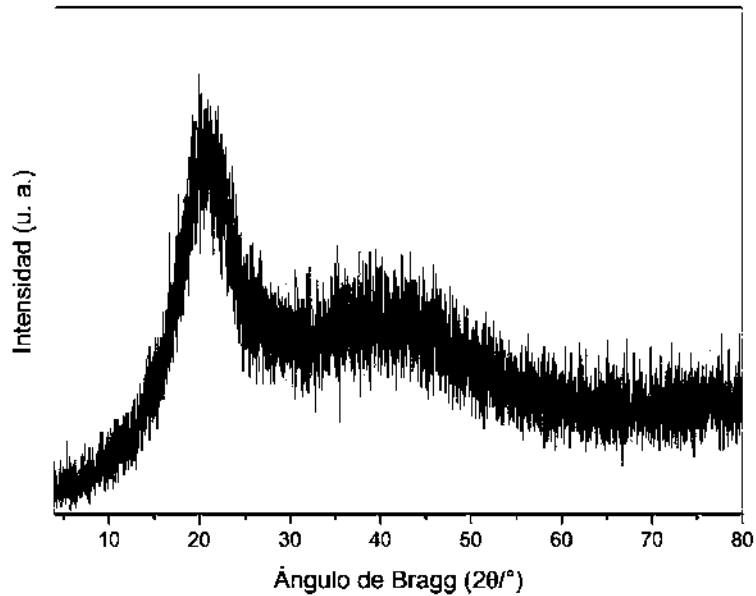


**Figura 18** Briquetas en la estufa de secado.

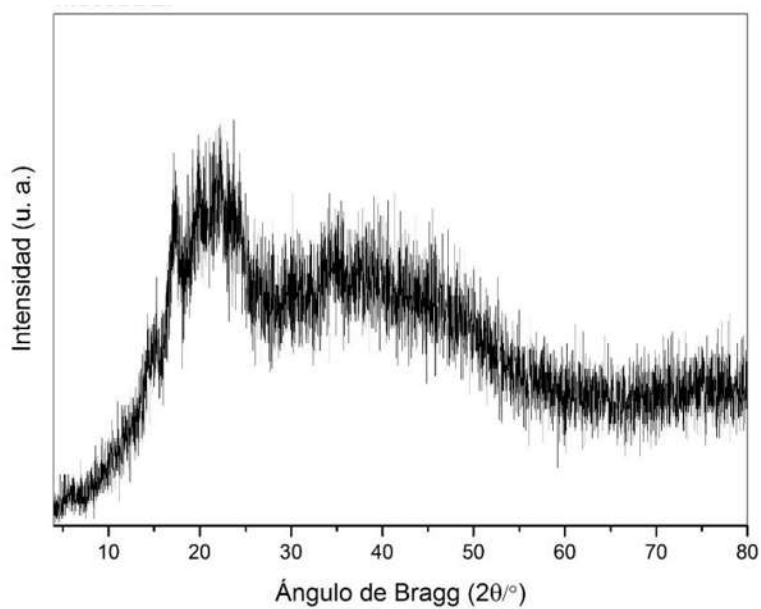
## 9.9 ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

El análisis de difracción de rayos X reportado por Ayunga (2021) en la Universidad Autónoma Metropolitana con el cual se pueden identificar los elementos que están presentes en las muestras, así como sus fases cristalinas, en dicho análisis no se detectó elementos inorgánicos, con lo que se reafirma que los residuos de aguacate son factibles de ser utilizados para elaborar biocombustibles.

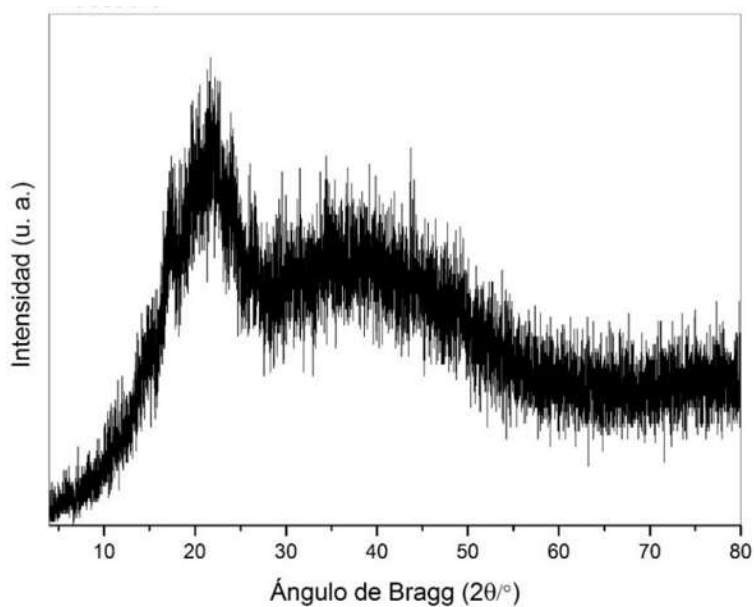
En las Figuras 19, 20 y 21 se presentan los difractogramas de los tres tipos de muestra (cáscara, semilla y mezcla de ambas con un poco de pulpa). La forma amorfa para los tres casos nos indica que la composición es característica a la de un material orgánico.



**Figura 19** Análisis de difracción de rayos X para la cáscara del aguacate. Fuente: (Ayungua Gutierrez, 2020) a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO.



**Figura 20** Análisis de difracción de rayos X para la semilla del aguacate. Fuente: (Ayungua Gutierrez, 2020) a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO



**Figura 21** Análisis de difracción de rayos X para la mezcla del residuo de aguacate. Fuente: (Ayungua Gutierrez, 2020) a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO

## 9.10 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

La determinación del poder calorífico se realizó por medio de la ecuación presentada por Cordero et al (2001):  $HHV = 354.2FC + 170.8 VM$ , donde HHV representa el poder calorífico superior (KJ/Kg), y FC y VM son el carbono fijo y el contenido de material volátil respectivamente, ambos en porcentaje del peso en base seca. De acuerdo con los análisis realizados se tiene que el FC es de 12.79 y VM de 87.21, lo que nos da como resultado un HHV (o poder calorífico superior) de 19,381.61 KJ/KG. De acuerdo a los datos presentados por Perea et al (2016), el poder calorífico de la semilla de aguacate está alrededor de 19 MJ/kg, lo que le da una capacidad calorífica adecuada para ser usados como combustible. Ballesteros Vásquez reporta en su trabajo del 2018 un poder calorífico para la semilla de aguacate de 19,041.08 KJ/ Kg con un porcentaje de humedad del 10%, similar a lo reportado por Perea y colaboradores, en ese mismo trabajo reporta un poder calorífico para la cascara de aguacate de 26,808.87 KJ/Kg ( Ballesteros Vásquez, 2018), lo que confirma que los residuos de aguacate cuentan con las características para ser utilizados como materia prima para elaborar biocombustibles sólidos de calidad.

## 9.11 COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL BIOCOMBUSTIBLE ELABORADO CON LA NORMA CEN/TC 343 DEL COMITÉ EUROPEO PARA LA ESTANDARIZACIÓN

En la tabla 5 se muestran los parámetros establecidos por la norma CEN/TC 343 del Comité Europeo para la Estandarización. Las columnas 3 y 4 de la tabla marcan una diferencia de calidad dentro de la misma normativa, para poder etiquetar un producto como EN plus A1 (producto de mayor calidad) se deben cumplir con los parámetros establecidos los cuales son un poco más estrictos que lo de la EN plus A2, en la columna final de la columna se aprecian las características obtenidas de las briquetas de residuos de aguacate elaboradas en este proyecto.



**Tabla 5** Parámetros establecidos por la norma internacional CEN/TC343 para biocombustibles sólidos.

Parámetro	Unidad	ENplus A1	ENplus A2	Briquetas fabricación propia
Humedad	m-% b)	≤ 12	≤ 15	10%
Ceniza	m-% a)	≤ 1.0	≤ 1.5	3.53
Densidad de partícula	g/cm <sup>3</sup> b)	≥ 1.0	≥ 0.9	
Poder calorífico	MJ/kg b) (kWh/kg)	≥ 15.5 (≥ 4.3)	≥ 15.3 (≥ 4.25)	19.041
Nitrógeno	m-% a)	≤ 0.3	≤ 0.5	0.92
Azufre	m-% a)	≤ 0.04	≤ 0.04	---
Cloro	m-% a)	≤ 0.02	≤ 0.02	---
Arsénico	mg/kg a)	≤ 1		---
Cadmio	mg/kg a)	≤ 0.5		---
Cromo	mg/kg a)	≤ 10		---
Cobre	mg/kg a)	≤ 10		---
Plomo	mg/kg a)	≤ 10		---
Mercurio	mg/kg a)	≤ 0.1		---
Nickel	mg/kg a)	≤ 10		---
Zinc	mg/kg a)	≤ 100		13.04 ppm
a) en base seca				
b) como se entrega				

Los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos son que el biocombustible cumple con los estándares internacionales de poder calorífico y de contenido de

contaminantes. De lo anterior, la valorización de los residuos de aguacate se puede disminuir la contaminación ambiental y la presión por otros recursos como la madera.

## 10.- CONCLUSIONES

Los residuos generados por la industrialización del aguacate son viables como materia prima para la producción de biocombustibles sólidos en lugar de ser desechados en el relleno sanitario municipal de Morelia dado que su poder calorífico oscila alrededor de los 19,000 MJ/Kg, cumpliendo lo establecido en la norma europea CEN/TC343.

Con la valorización del total de los residuos que genera la empresa de la que se toman para efectos de este estudio, se liberan 11,863.89 m<sup>3</sup> anuales de espacio en el relleno sanitario municipal de Morelia, lo que alargaría su tiempo de vida útil aproximadamente 11 días por año.

La utilización de los residuos de aguacate es benéfica para el medio ambiente ya que reduce la materia orgánica en el relleno sanitario, donde por reacciones físicoquímicas generan contaminación de agua y suelos por lixiviados, y del aire por la generación de CH<sub>4</sub> (metano) y CO<sub>2</sub> (dioxido de carbono), además de que estos gases, al ser considerados gases de efecto invernadero (GEI) contribuyen al calentamiento global.

Aunque no se realizó la prueba para determinar metales pesados y cloro en los residuos de aguacate, los difractogramas de rayos X indican que los residuos están libres de estos contaminantes. Lo anterior se corrobora con la información de la empresa que certifica que los aguacates que se utilizan para la elaboración del guacamole están libres de agroquímicos.

Las pruebas de compresión a diferentes fuerzas utilizadas permiten concluir que este residuo aunque cumple con los estándares internacionales para utilizarlo como biocombustible, se requiere la adición de un aglutinante para la elaboración de las briquetas.

## 11.- BIBLIOGRAFÍA

- Ballesteros Vásquez, L. C. (2018). El Biosecado como bioproceso para la valorización energética de residuos agrícolas y agroindustriales. Ciudad de México, México.
- Abreham, B., & Zerga, B. (2015). Biofuel energy for mitigation of climate change in Ethiopia. *Journal of Energy and Natural Resources*, 62-72.
- Agudelo, L. C. (2005). Sobre la noción de territorio en la planificación. *Gestión y ambiente*, Volumen 8 - No 2 .
- Alonso-Estrada, N. M., Ruiz-Zarco, R. A., Sotelo-León, A., & Navarrete-Morales, O. D. (2014). *Reutilización de los residuos sólidos orgánicos de la Universidad Tecnológica de Morelia en forma de fertilizante orgánico*. Morelia: Universidad Tecnológica de Morelia.
- Álvarez Maciel , C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, Num. 359; julio-agosto; 63-89.
- Álvarez Béjar, A., & Lina Montes, N. (2014). ¿Son los biocombustibles una opción en la lucha contra el cambio climático? En C. Gay y Garcia, & A. Cos Gutiérrez, *Biocombustibles en México una alternativa para la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y la mitigación de los gases de efecto invernadero* (págs. 36-57). CDMX: Programa de investigación en cambio climático, UNiversidad Nacional Autonomoa de México.
- Avhad, M., & Marchetti, J. (2015). temperature and pretreatment effects on the drying of Hass avocado seeds. *Biomass and Bioenergy*, 467-473. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.10.028>

- Ayungua Gutierrez, J. Y. (2020). Análisis termogravimétrico de la biomasa del residuo de aguacate. Morelia, Michoacán, México.
- Balseca-Sampedro, O. F., López-Ortiz, S. A., Viteri-Núñez, E. F., Analuisa-López, D. S., & Hernandez-Gavilanes, E. V. (2018). Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café (borra) como biocombustible sólido. *Polo del Conocimiento*, Vol 3, No 7, pp 420-452 .
- Barbosa-Martín, E., Chel-Guerrero, L., Gonzáles-Mondragón, E., & Betancour-Ancona, D. (2016). Chemical and technological properties of avocado (*Persea Americana*, Mill) seed fibrous residues. *Food and Bioproducts Processing*, 100, Part A, 457- 463. doi:<http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.fbp.2016.09.006>
- Berman Delgado, J. B., Lois Correa, J. A., & Romero Treviño, E. M. (2011). Caracterización de alimentos a base de melaza de caña para engorda de ganado. *23° Encuentro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica del Golfo de México*. Altamira.
- Buenrostro Delgado, O., & Israde, I. (2003 ). LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO, MÉXICO. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Volumen 19; pp 161-169.
- Buenrostro-Delgado, O., Hernández-Paniagua, I. Y., Hernández-Berriel, M. d., & Nila-Cuevas, J. A. (2015). Análisis de compuestos lignocelulósicos como opción para evaluar la biodegradabilidad de la fracción orgánica en residuos sólidos confinados en México. *Biológicas*, 17(2): 1-4.
- Ceballos P., A. M., & Montoya B., S. (2013). Evaluación química de la fibra en semilla, pulpa y cáscara de tres variedades de aguacate. *Bioteología en Sector Agropecuario y Agroindustrial*.
- Cordero, T., Marquez, F., Rodriguez-Mirasol, J., & Rodriguez, J. (2001). Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel*, 1567-1571.

- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., Gonzáles-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pelets y briquetas. *Revista Capingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*.
- Creutzling, F., RAVINDRANATH, N., BERNERDE S, G., BOLWIG, S., BRIGHT, R., CHERUBINI, F., . . . MASERA, O. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *BIOENERGY AND CLIMATE CHANGE MITIGATION*, 916–944.
- Dabas, D., Elias, R. J., Lambert, J. D., & Ziegler, G. R. (2011). A colored avocado seed extracts as a potential natural colorant. *Journal of Food Science*.
- Díaz-Archundia, L. V., Buenrostro-Delgado, O., Mañon-Salas, M. d., & Hernandez-Berriel, M. d. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVIII (número 2), 149-159.
- Flamme, S., & Geiping, J. (2012). Quality standards and requirements for solid recovered fuels: A review. *Waste management and research*, 335-353.
- Gangil, S. (2014). Superiority of intrinsic biopolymeric constituents in briquettes of lignocellulosic crop residues over wood: A TG-diagnosis. *Renewable Energy*.
- García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of european standards for pellets quality. *Renewable Energy*.
- Gay y Garcia, C., & Rueda Abad, J. C. (2015). *Reporte Mexicano de Cambio Climático*. México, D.F.: UNAM.
- Gonzales-Fernández, J., Galea, Z., Alvarez, J. M., Hormaza, J., & Lopez, R. (2015). Evaluation of composition and performance of compost derived from guacamole productions residues. *Journal of Environmental Management*, 132-139.
- Google Earth. (2021). Ubicación Relleno Sanitario de Morelia Michoacán. México.

- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712-725. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- Hernández, S. (19 de Octubre de 2019). *www.elsoldemorelia.com.mx*. Obtenido de <https://www.elsoldemorelia.com.mx/local/inaugura-veolia-celda-para-tratar-los-residuos-solidos-4309777.html#:~:text=%2D%20Para%20dar%20cabida%20a%20los,al%20subsuelo%20y%20medio%20ambiente>.
- Hernández-Berriel, M. d., Hernández-Paniagua, I. Y., Clemitshaw, K. C., Nila-Cuevas, J. A., & Buenrostro-Delgado, O. (2019). Evaluation of confinement conditions and content of lignocellulosic compounds on urban solid waste biodegradation rates. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 91-100.
- INECC. (2018). Inventario Nacional de Emisiones Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. *INEGYCEI*. México: Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. Obtenido de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: <https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/Emisiones.html>
- INECC. (Mayo de 2021). *cambioclimatico.gob.mx*. Obtenido de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: <https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/Emisiones.html>
- INEGI. (05 de 2021). *www.inegi.org.mx*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=Morelia>
- Israde-Alcántara Isabel, Buenrostro Delgado Otoniel, Carrillo Chávez Alejandro (2005). Geological characterization and environmental implications of the placement of the Morelia dump, Michoacán, central Mexico. *Journal of the Air and Waste management association*. Vol. 55, Issue 6 (June), pp. 755-764. 1096-2247
- Jazcilevich, A. (2014). Una visión acerca de energía, cambio climático y biocombustibles. En C. Gay y García, & A. Cos Gutierrez, *Biocombustibles*

*en México: una alternativa para la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y la mitigación de los gases de efecto invernadero* (págs. 58-79). México: UNAM.

Karunanithy, C., Wang, Y., Muthukumarappan, K., & Pugalendhi, S. (2012). Physiochemical characterization of briquettes made from different feedstocks. *Biotechnology Research International*, 12. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2012/165202>

Lina Montes, N., & Álvarez Béjar, A. (2014). Los biocombustibles en America Latina y México. En C. Gay y García, & A. Cos Gutiérrez, *Biocombustibles en México: Una alternativa para la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y la mitigación de los gases de efecto invernadero* (págs. 81-105). México: UNAM.

Loayza-Pérez, J. E., & Silva-Meza, M. (2006). Cálculos básicos para la determinación de la vida útil de un relleno sanitario. *Rev. Per. Quim. Ing. Quim*, Vol. 9, No 1, 37-42.

Márquez-Benavides, L., Buenrostro-Delgado, O., Sánchez-Yañez, J. M., & Hernández-Berriel, M. d. (2013). Biodigestión anaerobia de residuos sólidos: variables abióticas. *VSIR-REDISA*.

Miranda Caicedo , I. J., & Amaris Rincón, O. L. (2009). *Aprovechamiento del potencial energético de la biomasa residual obtenida de la extracción del aceite de palma en Colombia*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Mitchual, S. J., Frimpong-Mensah, K., Darkwa, N. A., & Akowuah, J. O. (2013). Briquettes from maize cobs and Ceiba pentandra at room temperature and low compacting pressure without a binder. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*.

Morales-Maximo, M. (2019). *Aprovechamiento del aserrón y viruta de pino (Pinuss ssp) para la producción y evaluación de briquetas como energía alterna en la comunidad de San Francisco Pichataro Michoacán*. Morelia: UMSNH.



- Navarrete-Morales, O. D. (2016). *Determinación del poder calorífico de briquetas elaboradas con residuos hortofrutícolas de la ciudad de Morelia*. Morelia: Universidad Tecnológica de Morelia.
- Orbes-Calcedo, A. S. (2012). *Aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos en el colegio*. San Juan de Pasto: Liceo Universidad de Nariño.
- Ortíz, L., Tejada, A., Vázquez, A., & Piñeiro Veiras, G. (2003). Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena Monte-Industria. *Revista CIS-Madera*.
- Palma, C., Lloret, L., Puen, A., Tovar, M., & Contreras, E. (2015). Production of carbonaceous material from avocado peel for its application as alternative adsorbent for dyes removal. *Chinese journal of chemical engineering*.
- Perea-Moreno, A.-J., Aguilera-Ureña, M.-J., & Manzano-Anguiano, F. (2016). Fuel properties of avocado. *Fuel*, 358-364. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.101>
- Pieratti, E., Paletto, A., Atena, A., Bernardi, S., Palm, M., Patzelt, D., . . . Schnabel, T. (2020). Environmental and climate change impacts of eighteen biomass-based plants in the alpine region: A comparative analysis. *Journal of Cleaner Production*.
- Prvulovic, S., Gluvakov, Z., Tolmac, J., Tolmac, D., Matic, M., & Brkic, M. (2014). Methods for determination of biomass energy pellet quality. *Energy & Fuels*, 2013-2018. doi:<https://doi.org/10.1021/ef402361k>
- Punin, W., Maneewan, S., & Punlek, C. (2014). The feasibility of converting solid waste into refuse-derived fuel 5 via mechanical biological treatment process. *Mater Cycle Waste Manag*, 753-762.
- Raymond Chia, T. W., & Dykes, G. A. (2010). Antimicrobial activity of crude epicarp and seed extracts from mature avocado fruit (*Persea americana*) of the cultivars. *Pharmaceutical Biology*, 753-756.

- REMBIO, R. (28 de 11 de 2017). <http://rembio.org.mx>. Obtenido de <http://rembio.org.mx/areas-tematicas/biocombustibles-solidos/>
- Riegelhaupt, E. (2016). Biocombustibles sólidos. En C. A. García bustamante, O. Masera Cerutti, C. García Bustamante, & O. Masera Cerutti (Edits.), *Estado del arte de la bioenergía en México* (págs. 23 - 33). Guadalajara, Jalisco, México: Red Temática de Bioenergía (RTB) CONACYT.
- Rotta, E. M., Rodriguez de Morais, D., Franca Biondo, P. B., Jorge dos Santos, V., Matsushita, M., & Visentainer, J. V. (2016). Use of avocado peel (*Persea americana*) in tea formulation: a functional product containing phenolic compounds with antioxidant activity. *Acta Scientiarum. Technology*.
- SAGARPA. (22 de Febrero de 2018). Boletín mensual de la producción de Aguacate. México.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy reviews*, 2262-2289.
- Salmerón-Gallardo, Y. A., Cabrera-Cruz, R. B., Juárez-López, A. L., Sampedro-Rosas, M. L., Rosas-Acevedo, J. L., Rilón-Aguilar, J. C., & Valera-Pérez, M. A. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero en vertederos de residuos sólidos urbanos parte B: mitigación de biogás en Acapulco, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, Vol. 4, No 2.
- Sánchez, F., Araus, K., Domínguez, M., & San Miguel, G. (2016). Thermochemical transformation of residual avocado seeds: torrefaction and carbonization. *Waste Biomass Valor*.
- SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA. (10 de Diciembre de 1984). NMX-AA-18-1984. *PROTECCION AL AMBIENTE-CONTAMINACION DE SUELO-RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES-DETERMINACION DE CENIZAS*. México: DOF.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. (14 de Abril de 1986). NMX-AA-068-1986. *Protección al ambiente- Contaminación de suelo- Residuos sólidos municipales- Determinación de hidrógeno a partir de materia orgánica.* México: Secretaría de comercio y fomento industrial.

SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA. (14 de Julio de 1986). NMX-AA-080-1986. *CONTAMINACION DEL SUELO - RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE OXIGENO EN MATERIA ORGANICA.* México: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA. (06 de Noviembre de 1992). NORMA MEXICANA NMX-AA-15-1985. *PROTECCIÓN AL AMBIENTE - CONTAMINACIÓN DEL SUELO - RESIDUOS.* México: DOF.

SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA. (06 de Noviembre de 1992). NORMA MEXICANA NMX-AA-16-1984. *PROTECCIÓN AL AMBIENTE -CONTAMINACIÓN DEL SUELO - RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACIÓN DE HUMEDAD.* México.

SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA. (06 de Noviembre de 1992). NORMA MEXICANA NMX-AA-19-1985. *PROTECCIÓN AL AMBIENTE -CONTAMINACIÓN DEL SUELO - RESIDUOSSÓLIDOS MUNICIPALES - PESO VOLUMÉTRICO "IN SITU".* México: DOF.

SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA. (06 de Noviembre de 1992). NORMA MEXICANA NMX-AA-21-1985. *PROTECCIÓN AL AMBIENTE-CONTAMINACIÓN DEL SUELO - RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA.* México: DOF.

SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA. (06 de Noviembre de 1992). NORMA MEXICANA NMX-AA-24-1984. *PROTECCIÓN AL AMBIENTE - CONTAMINACIÓN DEL SUELO - RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO TOTAL.* México: DOF.

SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA. (06 de Noviembre de 1992). NORMA MEXICANA NMX-AA-33-1985. *PROTECCION AL AMBIENTE-CONTAMINACION DEL SUELO-RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES-DETERMINACION DE PODER CALORIFICO SUPERIOR*. México: DOF.

SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA. (06 de Noviembre de 1992). NORMA MEXICANA NMX-AA-67-1985. *PROTECCION AL AMBIENTE - CONTAMINACION DEL SUELO - RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACION DE LA RELACION CARBONO/NITROGENO*. México: DOF.

SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA. (06 de Noviembre de 1992). NORMA MEXICANA NMX-AA-94-1985. *PROTECCION AL AMBIENTE - CONTAMINACION DEL SUELO - RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACION DE FOSFORO TOTAL*. México: DOF.

SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA. (06 de Noviembre de 1992). SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGÍA. *PROTECCIÓN AL AMBIENTE -CONTAMINACIÓN DEL SUELO - RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES - DETERMINACIÓN DE HUMEDAD*. México: DOF.

SECRETARIA DE DESARROLLO URBANO Y ECOLOGIA. (06 de Noviembre de 1992). NORMA MEXICANA NMX-AA-52-1985. *PROTECCION AL AMBIENTE- CONTAMINACION DEL SUELO-RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES-PREPARACION DE MUESTRAS EN EL LABORATORIO PARA SU ANALISIS*. México: DOF.

Secretaría de Economía. (2001). NMX-AA-073-SCFI-2001. *ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE CLORUROS TOTALES EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA*. México: Secretaría de economía.

Secretaría de Economía. (04 de 08 de 2006). PROY-NMX-AA-048-SCFI-2001. *RESIDUOS.- DETERMINACIÓN DE METALES POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA EN PRODUCTOS DE EXTRACCIÓN DE CONSTITUYENTES TÓXICOS (PECT)*. México: DOF.

Secretaría de Energía. (2016). *Perspectiva de energías renovables 2016-2030*. México.

Secretaría de Industria y Comercio. (30 de Noviembre de 1976). DGN-AA-33-1976. *NORMA Oficial Mexicana. "Determinación del Poder Calorífico en Desechos Sólidos"*. México: DOF.

Secretaría de salud. (15 de Agosto de 1994). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-117-SSA1-1994. *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-117-SSA1-1994, BIENES Y SERVICIOS. METODO DE PRUEBA PARA LA DETERMINACION DE CADMIO, ARSENICO, PLOMO, ESTAÑO, COBRE, FIERRO, ZINC Y MERCURIO EN ALIMENTOS, AGUA POTABLE Y AGUA PURIFICADA POR ESPECTROMETRIA DE ABSORCION ATOMICA*. México: DOF.

Segovia Gómez, F., Corral, J. J., & Almajano, M. P. (2013). Estudio cinético de la extracción Sólido-Líquido de los compuestos polifenólicos del residuo del aguacate. *JORNADES DE RECERCA EUETIB 2013*.

SEMARNAT. (20 de oCTUBRE de 2004). NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. *Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*. MÉXICO: Diario Oficial de la Federación.

SEMARNAT. (Marzo de 2017). *Residuos solidos urbanos y de manejo especial*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>

- SEMARNAT. (Mayo de 2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos. Ciudad de México, México.
- SIERRA AGUILAR, J. (2009). ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LA CASCARILLA DE ARROZ. Sucre, Colombia.
- Srivastava, N., Narnaware, S., Makwana, J., Singh, S., & Vahora, S. (2014). Investigating the energy use of vegetable market waste by briquetting. *Renewable Energy*, 270-275.
- Standard Methods. (1989). Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. New York: American Public Health Association.
- Ulloa Leitón , A. (2014). *Oferta y demanda de biomasa forestal en el área de influencia de la empresa Biomass Costa Rica, Guanacaste*. Guanacaste: INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA.
- Valdivias-Aguilar, J. R., López-Granados, E. M., Mendoza, M. E., Aguilera-Soria, R., Lanni, E., & Garduño-Monroy, V. H. (en imprenta). Historia del crecimiento urbano de la ciudad de Morelia y su exposición a peligros naturales. En F. Güiza, *Morelia entre dos ríos*. Morelia: UNAM.
- Yilmaz, S., & Selim, H. (2013). A review on the methods for biomass to energy conversion systems design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 420-430. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.015>
- Zhu, Y., Kolar, P., Shah, S. B., Cheng, J. J., & Lim, P. (2016). Avocado seed-derived activated carbon for mitigation of aqueous ammonium. *Industrial crops and products*.
- Zidansek, A., Blinc, R., Jeglic, A., Kabashi, S., Bekteshi, S., & Slaus, I. (2008). Climate changes, biofuels and the sustainable future. *International journal of hydrogen energy*, 1-4.

## 12.- ANEXOS

### 12.1 DETERMINACIÓN DE PESO VOLUMÉTRICO “IN SITU”

Norma mexicana NMX-AA-19-1985.

#### PROCEDIMIENTO:

Para efectuar esta determinación, se requiere de cuando menos dos personas.

Antes de efectuar la determinación se verifica que el recipiente esté limpio y libre de abolladuras; así como también que la báscula esté nivelada. A continuación, se pesa el recipiente vacío, tomando este peso como la tara del recipiente.

En caso dado de no conocer la capacidad del recipiente, ésta se determina a partir de las formulaciones aritméticas existentes, según sea la geometría de dicho recipiente.

A continuación, llenar el recipiente hasta el tope con residuos sólidos homogeneizados, golpee el recipiente contra el suelo tres veces dejándolo caer desde una altura de 10 cm. Nuevamente agregue residuos sólidos hasta el tope, teniendo cuidado de no presionar al colocarlos en el recipiente; esto con el fin de no alterar el peso volumétrico que se pretende determinar.

Se debe tener cuidado de vaciar dentro del recipiente todo el residuo, sin descartar los finos.

Para obtener el peso neto de los residuos sólidos, se pesa el recipiente con estos y se resta el valor de la tara.

Cuando no se tenga suficiente cantidad de residuos sólidos para llenar el recipiente se marca en éste, la altura alcanzada y se determina dicho volumen.

#### CÁLCULO

El peso volumétrico del residuo sólido se calcula mediante la siguiente fórmula

$$P_v = \frac{P}{V}$$

en donde:

Pv = Peso volumétrico del residuo sólido, en kg/m<sup>3</sup>

P = Peso de los residuos sólidos (peso bruto menos tara), en kg

V = Volumen del recipiente, en m<sup>3</sup>

## 12.2 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD

De acuerdo a la norma mexicana NMX-AA-16-1984.

### PROCEDIMIENTO:

Colocar la caja abierta y su tapa en la estufa a 393 K (120°C) durante dos horas, transcurrido ese tiempo, se tapa la caja dentro de la estufa, e inmediatamente se pasa al desecador durante dos horas como mínimo o hasta obtener peso constante.

Se vierte la muestra sin compactar hasta un 50% del volumen de la caja.

Se pesa la caja cerrada con la muestra y se introduce destapada a la estufa a 333 °K (60°C) durante 2 horas, se deja enfriar y se pesa nuevamente. Se repite esta operación las veces que sea necesario hasta obtener peso constante (se considera peso constante cuando entre dos pesadas consecutivas la diferencia es menor al 0.01 %).

### Cálculos

El porcentaje de humedad se calculará con la siguiente fórmula, teniendo en cuenta que para obtener G y G1 se debe restar el peso de la caja.

$$H = \frac{G - G1}{G} \times 100 \quad (\text{ecuación 1})$$

donde:

H = Humedad en %

G = Peso de la muestra húmeda en g



G1 = Peso de la muestra seca en g.

### 12.3 DETERMINACIÓN DE CENIZA

La norma mexicana NMX-AA-18-1984 establece el método de prueba para la determinación de cenizas de los residuos sólidos municipales. Para la cual se requiere el siguiente equipo:

Balanza con sensibilidad de 0.1 g

Mufla

Crisol de porcelana o platino de 50 cm<sup>3</sup>.

Desecador

#### PROCEDIMIENTO:

La muestra se seca hasta peso constante a 333 °K (60°C) y se deja enfriar en el desecador.

Poner a peso constante el crisol a temperatura de 473 °K (200°C) durante dos horas, se deja enfriar en el desecador y se pesa.

Transferir al crisol aproximadamente 20 g de la muestra seca (que se indica en Paso 1) y se pesa con aproximación de 0.1 g.

Calcinar en la mufla a 1073 °K (800°C) hasta obtener peso constante (se recomienda comprobar el peso constante transcurrida una hora) se deja enfriar en el desecador y se pesa.

El porcentaje de cenizas en base seca se calcula con la siguiente fórmula.

Cálculos establecidos en la norma.

El porcentaje de cenizas en base seca se calcula con la siguiente ecuación.

$$G3 - G1$$

$$C = \frac{\text{-----}}{\text{-----}} \times 100 \quad (\text{ecuación 4})$$

G2 - G1

Donde:

C = Porcentaje de cenizas en base seca

G1 = Peso del crisol vacío en g

G2 = Peso del crisol más la muestra seca en g

G3 = Peso del crisol más la muestra calcinada en g

#### 12.4 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

En la determinación del poder calorífico se utilizará la norma mexicana NMX-AA-33-1985, esta Norma Mexicana especifica un método de prueba para determinar el poder calorífico superior de los residuos sólidos municipales, empleando una bomba calorimétrica.

PROCEDIMIENTO (el procedimiento puede variar según las indicaciones del equipo que se utilice):

El aparato se calibra usando como material combustible una cápsula de ácido benzoico de peso conocido (0.9 a 1.25 g) y se procede de la misma manera que en el caso de una muestra problema

La muestra se seca a peso constante y se pesan de 0.6 a 1.5 g para formar en la prensa, una pastilla de peso conocido.

Unir 10 cm de alambre de encendido a los electrodos del cabezal.

Introducir la pastilla dentro de la cápsula metálica de combustión verificando que el alambre permanezca en contacto con la muestra

El conjunto se adapta al cilindro de la bomba enroscando el cabezal hasta lograr un cierre hermético.

Se introduce oxígeno lentamente en el interior de la bomba a fin de evitar la dispersión del producto en la cápsula, hasta alcanzar una presión de 25 a 35 atmósferas. Se recomienda emplear 30 atmósferas de presión

Se conectan los electrodos en la parte superior de la tapa bomba

Se procede a quemar la muestra

Desalojar el contenido

Medir los restos de alambre no quemado y restar de los 10 cm iniciales

Obtener los resultados del equipo.

## 12.5 DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE CARBONO

NMX-AA-67-1985

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) está en función del % de materia orgánica (%M.O.) obtenido de acuerdo a la constante de Jackson y del % de Nitrógeno total (%N).

Para determinar el contenido de carbono se multiplica el % de materia orgánica x 0.58 donde:

0.58 = constante dada por Jackson.

Por lo tanto, la ecuación para determinar la relación (C/N) es:

$$(C/N) = \frac{(\% M.O.) \times 0.58}{\% N} \quad (\text{ecuación 5})$$

donde:

% N = % Nitrógeno total obtenido según NMX-AA-24-1984

(% M.O.) = % Materia orgánica obtenida según norma NOM-AA-21-1985

## 12.6 DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HIDRÓGENO

NMX-AA-068-1986

Está en función del porcentaje de materia orgánica obtenido de acuerdo a la constante de Jackson. Para conocer el por ciento de hidrógeno (%H) en una muestra, se emplea la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{\% \text{ de materia orgánica}}{15} \quad (\text{ecuación 6})$$

Dónde:

15= factor de correlación que utiliza Jackson, obtenido de datos experimentales.

El % de materia orgánica se obtiene de la NMX-AA-021-1985

## 12.7 DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE OXÍGENO

NMX-AA-080-1986

### APARATOS Y EQUIPO

Balanza analítica con sensibilidad de 0.001 g.

Parrilla eléctrica esférica con reóstato, con chaqueta de asbesto, para matraz bola de 500 cm<sup>3</sup> que alcance una temperatura de 423 °K (150 °C).

Parrilla con chaqueta de asbesto con regulador de temperatura hasta 1473 °K (1200 °C) para recipiente cilíndrico.

Cilindro con Nitrógeno seco.

Matraz bola de tres bocas de 500 cm<sup>3</sup>.

Tubo de vidrio de 30 cm de longitud con diámetro interior de 3 cm aproximadamente, protegido con material refractario.

Tubo de vidrio de 30 cm de longitud con diámetro interior de 3 cm aproximadamente.

Conexiones de vidrio.

## REACTIVOS Y MATERIALES

### Reactivos

Cuando se hable de agua se debe entender agua destilada.

Nitrógeno seco.

Carbón activado.

Pentóxido de yodo.

200 cm<sup>3</sup> de una solución de hidróxido de sodio de concentración 1 x

10<sup>-6</sup>N.

100 cm<sup>3</sup> de una solución de tiosulfato de sodio de concentración 0.2 N

### Material

Piedras de ebullición.

## PROCEDIMIENTO

En el matraz de tres bocas depositar 4 a 5 g de muestra.

Llenar el tubo de vidrio protegido con carbón activado

Llenar el tubo de vidrio con una mezcla de pentóxido de yodo y piedras de ebullición.

Conectar el equipo (ver figura 1).

Regular el flujo de Nitrógeno a 50 cm<sup>3</sup>/min.

Encender la parrilla que calienta el carbón, hasta alcanzar la temperatura de 1473 °K (1200 °C).

Burbujear la fase gaseosa en un volumen de 200 cm<sup>3</sup> de solución de hidróxido de sodio.

Calentar el matraz donde se encuentra la muestra hasta 423 °K (150 °C) durante 30 minutos.

Valorar la solución de hidróxido de sodio con tiosulfato de sodio.

## CALCULOS

El porcentaje de Oxígeno (%O) se calcula con la siguiente fórmula:

$$\% O = \frac{N1 \cdot V1}{M2} \cdot (5) \cdot (16) \cdot (100) \quad (\text{ecuación 7})$$

Donde:

N1 = Normalidad de la solución de Tiosulfato de Sodio.

V1 = Volumen consumido de la solución de Tiosulfato de Sodio.

M2 = Peso de la muestra de residuo sólido en g.

5 = Factor de relación entre los moles de Monóxido de carbono con los moles de Oxígeno.

16 = Peso atómico de Oxígeno.

100 = Factor de conversión a porcentaje.

## 12.8 DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE NITRÓGENO

NMX-AA-24-1984.

Se requiere del siguiente equipo:

Aparato de digestión Kjeldahl con extractor de humos

Aparato de destilación Kjeldahl

Matraces Kjeldahl de 800 a 1000 cm<sup>3</sup>

Potenciómetro

NOTA: Se requiere de otros Matraces Kjeldahl por muestra.

Materiales

Granalla de zinc de 20 mallas

Perlas de vidrio

Reactivos

Sulfato de potasio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Sulfato cúprico (CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O).

Ácido sulfúrico concentrada (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Ácido salicílico (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)

Tiosulfato de sodio cristalino (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 5H<sub>2</sub>O)

Alcohol etílico (CH<sub>3</sub> - CH<sub>2</sub> - OH) al 95%

Solución de hidróxido de sodio (NaOH) 10 N

Solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N

Solución de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0.1 N

Solución \*\*\* anaranjado de \*\*\*\*\* de anaranjado de metilo en la colección de 50 cm<sup>3</sup> de al \*\*\*\*\* analítico y 50 cm<sup>3</sup> de agua).

Solución indicadora mixta de rojo metileno que acuerdo de bromocresol (Pesar 1 g de rojo de metilo y 0.5 g de \*\*\*\*\* de bromocresol, se disuelven en 100 cm<sup>3</sup> de alcohol etílico \*\*\*\*\* lleva a un pH = 4.5).

PROCEDIMIENTO:

Digestión

Correr un blanco de agua.

Pesar 0.5 g de muestra y se transfiere a un matraz Kjeldahl.

Agregar 2 g de ácido salicílico y 40 cm<sup>3</sup> de ácido sulfúrico concentrado, agitar, hasta que el ácido se incorpore totalmente a la muestra, formándose el ácido nitrososalicílico.

Dejar reposar 30 minutos, y después añadir 10 g y de tiosulfato de sodio con el fin de reducir al ácido nitrososalicílico; agitar y dejar reposar por un período de 5 minutos.

Transcurrido el tiempo calentar la mezcla a flama baja en el matraz Kjeldahl hasta que no exista desprendimiento de humos blancos y la solución se clarifique. Continuar la digestión durante 30 minutos más. Retirar el matraz y dejar enfriar a temperatura ambiente.

Añadir 1 g de sulfato cúprico y 10 g de sulfato de potasio llevar a digestión hasta que la solución sea incolora o de color amarillo paja.

Preparar un matraz Erlenmeyer de 500 cm<sup>3</sup>, dentro del cual se vierten 25 cm<sup>3</sup> de solución de ácido sulfúrico y de 3 a 4 gotas de solución indicadora de anaranjado de metilo y se coloca abajo del condensador de manera que la punta quede en el seno del líquido.

Agregar al matraz Kjeldahl de 4 a 5 granallas de zinc y 10 perlas de vidrio.

Adicionar con cuidado 100 cm<sup>3</sup> de solución de hidróxido de sodio 10 N resbalando por las paredes del cuello del matraz y conectar al Destilador.

Destilación

Encender la parrilla del Destilador

Inclinar el matraz y agregar con mucho cuidado 150 cm<sup>3</sup>, de la solución de hidróxido de sodio. El matraz se calienta hasta que destile todo el amoniaco (Un máximo de 150 cm<sup>3</sup> de destilado se obtiene aproximadamente en 30 minutos).



Colocar el matraz colector del destilado en forma tal que el tubo de vidrio, de descarga conectado al condensador quede sobre la boca del matraz libre del contacto con la solución del ácido sulfúrico 0.1 N y se continúa destilando aproximadamente cinco minutos con el objeto de llenar el tubo de descarga.

Se interrumpe el calentamiento, se retira el matraz colector y se titula con la solución de ácido sulfúrico 0.1 N hasta que la solución vire a rosa.

Cálculos

El nitrógeno total en por ciento se calcula con la siguiente ecuación:

$$N_T \text{ en } \% = \frac{(A \cdot N_1 - B \cdot N_2) \times 0.014 \times 100}{M} \quad (\text{ecuación 8})$$

Donde:

A = Volumen de la solución de ácido sulfúrico empleado en la recolección del amoníaco destilado.

N1 = Normalidad del ácido sulfúrico.

B = Volumen de la solución de hidróxido de sodio empleado en la neutralización de la solución de ácido sulfúrico.

N2 = Normalidad de la solución del hidróxido de sodio 0.1 N

M = Masa de la muestra en g.

0.014 = Mili equivalente del nitrógeno.

100 = Para relacionar el nitrógeno a por ciento.

## 12.9 DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE AZUFRE

DGN-AA-31-1976

Reactivos y materiales.

Reactivos.

Cuando se hable de agua, se debe entender agua destilada.

Solución de cloruro de bario ( $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), al 10 por ciento.

Solución de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) al 1%.

Solución de ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ), 1.5

Materiales.

Papel filtro Whatman No. 40 o similar de 11 cm de diámetro.

Asbesto para filtración.

APARATOS Y EQUIPO.

Balanza analítica con sensibilidad de 0.0001 g.

Estufa con regulador de temperatura, capaz de alcanzar 100°C.

Mufla con regulador de temperatura capaz de alcanzar 800°C.

Baño de agua con regulador de temperatura.

Parrilla eléctrica.

Embudo de tallo corto de 12 cm de diámetro.

Matraces Erlenmeyer de 250 ml de capacidad.

Crisol de porcelana.

Crisol de Gooch.

Desecador con deshidratante adecuado.

PROCEDIMIENTO.

Para esta determinación, la muestra es la solución procedente del lavado de la bomba calorimétrica, después de haber titulado con la solución de carbonato de

sodio 0.0725 N según se indica en la Norma Mexicana. "Determinación del Poder Calorífico en Desechos Sólidos" DGN-AA-33 en vigor.

Se agregan 10 ml de ácido clorhídrico 1.5 (la concentración no debe exceder de 0.1 N). Se calienta dicha solución hasta ebullición y se añade con pipeta, la solución de cloruro de bario, gota a gota agitando suavemente durante la adición. Se añade un exceso de 20% sobre el contenido de azufre estimado. Digerir calentado a ebullición en el baño de agua durante una hora.

Se retira el vaso del baño al cabo de ese tiempo y se deja enfriar. Un ml de solución de cloruro de bario al 10% equivalente a 0.014 g de azufre.

El líquido sobrenadante se filtra mediante papel filtro Whatman No. 40 o similar, el precipitado se lava con agua caliente hasta que 10 ml de líquido de lavado no dé precipitado con 0.5 ml de solución de nitrato de plata al 1%.

El crisol con precipitado se seca en la estufa a 60 - 80°C y se calcina en mufla a 700 - 800°C. Se deja enfriar en el Desecador y se pesa. La diferencia en peso con respecto al crisol vacío, corresponde al sulfato de bario.

## CÁLCULOS

El porcentaje de azufre, se calcula con la siguiente ecuación:

$$c = \frac{G1 \times 0.1374}{G} \times 100 \quad (\text{ecuación 9})$$

En donde:

S = Contenido de azufre, en %.

G1 = Masa del sulfato de bario, en g.

G = Masa de la muestra inicial empleada en la prueba del poder Calorífico, en g.

0.1374 = Factor gravimétrico (Fg) del sulfato de bario a azufre (ecuación 10).

Peso atómico del azufre

$$Fg = \frac{\text{Peso atómico del azufre}}{\text{Peso molecular del sulfato de bario}} \quad (\text{ecuación 10})$$

Peso molecular del sulfato de bario

32.064

$$Fg = \frac{32.064}{223.404} = 0.1374$$

223.404

## 12.10 DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE FOSFORO

NMX-AA-94-1985

Aparatos y equipo

Balanza analítica con sensibilidad de 0.0001 g.

Espectrofotómetro o Colorímetro con celdas.

Parrilla de calentamiento con control de temperatura y agitación magnética.

Materiales.

Piedras de ebullición

Papel filtro Wathman (N° 5 o similar) de 11 cm de diámetro

Reactivos.

Cuando se hable de agua, debe entenderse por agua destilada o desmineralizada.

Ácido nítrico, (HNO<sub>3</sub>) 69 a 71 %

Ácido perclórico, (HClO<sub>4</sub>) 70 A 72 %

### Solución de Vanadomolibdato:

Disolver  $40 \pm 0.01$  g de heptamolibdato de amonio tetrahidratado:  $[(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7 \text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$  en  $400 \pm 1.0$  cm<sup>3</sup> de agua caliente a 323 °K (50 °C) y dejar enfriar a temperatura ambiente. Filtrar en caso de que la solución sea turbia. Diluir hasta  $500 \pm 1.0$  cm<sup>3</sup> con agua y homogeneizar. Almacenar en un frasco de vidrio color ámbar. Preparar una solución fresca cada dos meses.

En un matraz Erlenmeyer de 1000 cm<sup>3</sup> disolver  $2 \pm 0.01$  g de metavanadato de amonio ( $\text{NH}_4 \text{VO}_3$ ) en  $200 \pm 1.0$  cm<sup>3</sup> de agua caliente a 323 °K (50 °C) y dejar enfriar a temperatura ambiente. Por medio de una bureta adicionar gota a gota 450 cm<sup>3</sup> de ácido perclórico, ( $\text{HClO}_4$ ) empleando agitación magnética. Almacenar esta solución en un frasco de vidrio color ámbar.

Verter lentamente y con agitación (2) y diluir con agua a  $2000 \pm 2$  cm<sup>3</sup>.

Patrón primario de pentóxido de fósforo.

Pesar 9.5876 g de fosfato de potasio monobásico ( $\text{KH}_2 \text{PO}_4$ ) secado previamente a 378 °K (105 °C) por un mínimo de dos horas y disolver en aproximadamente 100 cm<sup>3</sup> de agua en un matraz aforado de 500 cm<sup>3</sup> y llenar hasta la marca con agua. Esta solución contiene 10 mg de  $\text{P}_2\text{O}_5$  por cm<sup>3</sup> almacenar esta solución en un frasco de vidrio de color ámbar por no más de dos semanas.

NOTA: A fin de asegurar la pureza del fosfato de potasio monobásico se recomienda recrystalizar en agua y secar hasta peso constante a una temperatura de 378 °K (105°C).

Solución de trabajo de pentóxido de fósforo. Diluir  $10 \pm 0.1$  cm<sup>3</sup> de solución patrón primario de pentóxido de fósforo en un matraz aforado de 1000 cm<sup>3</sup> y llevar hasta la marca en agua. Esta solución contiene 0.1 mg de  $\text{P}_2\text{O}_5$  por cm<sup>3</sup>

NOTA: Esta solución debe ser preparada diariamente.

### PROCEDIMIENTO

Recomendaciones de seguridad.

Tener cuidado con el manejo del ácido nítrico para destruir la materia orgánica fácilmente oxidable, pero no llevar a sequedad.

Trabajar con protección facial y bajo la campana.

La ceniza de tabaco, el sudor y el polvo contienen cantidades apreciables de fosfatos, por lo tanto, deben quedar excluidos del área de trabajo.

#### Determinación

Preparación de la solución de fósforo.

Transferir la muestra de análisis (10 g) a un vaso de precipitados de 250 cm<sup>3</sup>; agregar de 20 a 30 cm<sup>3</sup> de ácido nítrico, así como piedras de ebullición. Cubrir con un vidrio de reloj y llevar a ebullición en la parrilla de calentamiento de 30 a 45 minutos.

Dejar enfriar hasta temperatura ambiente, agregar de 10 a 20 cm<sup>3</sup> de ácido perclórico y calentar suavemente hasta que desaparezcan los vapores nitrosos. Si es necesario agregar porciones de 10 cm<sup>3</sup> de ácido nítrico tantas veces como se requiera para decolorar la solución.

Enfriar hasta temperatura ambiente y agregar 50 cm<sup>3</sup> de agua, llevar a ebullición durante 5 minutos. Filtrar y recibir el producto en un matraz aforado de 250 cm<sup>3</sup>. Lavar dos veces los residuos del papel filtro con agua caliente, enfriar hasta temperatura ambiente y llevar a la marca con agua.

Desarrollo de color.

Medir de la solución de trabajo una alícuota que contenga de 3 a 4 mg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, y transferir a un matraz aforado de 100 cm<sup>3</sup>.

NOTA: Para muestras con un contenido de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> menor de 0.5% se deben ajustar las diluciones de manera que la alícuota sobre la que se va a efectuar la determinación contenga de 3 a 4 mg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Blanco de prueba.

Simultáneamente se miden 20 cm<sup>3</sup> de la solución de trabajo de 0.1 mg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por cm<sup>3</sup> (2. Solución de trabajo de pentóxido de fósforo) y se transfieren a un matraz aforado de 100 cm<sup>3</sup>. Se ajusta con agua a un volumen aproximado de 50 cm<sup>3</sup> y tomando un tiempo no mayor de 5 minutos para toda la serie de determinaciones se agrega con bureta o pipeta 20 cm<sup>3</sup> de solución de vanadomolibdato. Se lleva hasta la marca con agua, se homogeneiza y se deja reposar 10 minutos.

Medición fotométrica.

El color se desarrolla rápidamente, pero usualmente se lee una vez que han transcurrido 10 minutos, con el fin de asegurar que alcance la máxima intensidad.

Transferir la solución de trabajo que contiene 2 mg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por cm<sup>3</sup> (blanco de prueba), así como la solución de la muestra (Determinación 1, paso 3) a las celdas.

Conducir un blanco de prueba paralelo a la determinación, con el fin de ajustar el espectrofotómetro o colorímetro. A lectura "cero" de absorbancia o 100% de transmitancia con una longitud de onda de 400 nm.

Se mide la absorbancia o transmitancia de la muestra y se anota la lectura.

NOTA: En caso de que se utilice un colorímetro, se emplea el filtro No. 42 que tiene un intervalo espectral de 400 a 465 nm.

Curva de calibración.

De la solución de trabajo de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (paso 2 de la solución de trabajo de pentóxido de fósforo) se miden alícuotas como se indica en la Tabla No. 1, se transfieren a matraces de 100 cm<sup>3</sup> y se prosigue como se indica en la determinación a partir de "desarrollo de color" a "medición fotométrica" inclusive.

Se elabora una gráfica tomando como ordenadas los mg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y como abscisas las lecturas de absorbancia o transmitancia.

NOTA: Elaborar nueva curva de calibración cada vez que se prepare el patrón primario de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (paso 2)

MÉTODO DE CÁLCULO Y FÓRMULAS.

El contenido de fósforo total está dado como:

$$\% P_2O_5 = \frac{(M_1) (V_1) (V_2)}{(M_0) (A_1) (A_2)} \cdot 100 \quad (\text{ecuación 11})$$

En donde:

$m_1$  = masa en mg de  $P_2O_5$  leídos en la curva de calibración para la muestra problema.

$V_1$  = Volumen en  $cm^3$  de la solución de la porción de análisis.

$V_2$  = Volumen en  $cm^3$  de la dilución igual a 100.

$m_0$  = masa en  $cm^3$  de la porción de análisis.

$A_1$  = Volumen en  $cm^3$  de la alícuota de la muestra.

$A_2$  = Volumen en  $cm^3$  de la alícuota de la solución de trabajo.

## 12.11 DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE CLORO

### NMX-AA-073-SCFI-2001

La determinación de cloruros por este método se basa en una valoración con nitrato de plata utilizando como indicador cromato de potasio. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. En las inmediaciones del punto de equivalencia al agotarse el ion cloruro, empieza la precipitación del cromato. La formación de cromato de plata puede identificarse por el cambio de color de la disolución a anaranjado-rojizo, así como en la forma del precipitado. En este momento se da por terminada la valoración.

Reactivos y patrones



Agua: Debe entenderse agua que cumpla con las siguientes características: a) Resistividad, megohm-cm<sup>1</sup> a 25°C: 0.2 min; b) Conductividad,  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 25°C: 5.0 Máx. y c) pH: 5.0 a 8.0

Nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ )

Cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ )

Cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ )

Hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ )

Ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )

Sulfato de aluminio y potasio dodecahidratado [ $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ]

Amoniaco concentrado ( $\text{NH}_3$ )

Disolución indicadora de cromato de potasio. Pesar aproximadamente y con precisión 50,0 g de cromato de potasio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) y disolver en 500 ml de agua y añadir disolución patrón de nitrato de plata (ver inciso siguiente) hasta que se produzca un precipitado rojo claro. Proteger la disolución de la luz y dejar estabilizar durante 24 h después de la adición de la disolución de nitrato de plata. Filtrar la disolución para remover el precipitado y aforar a 1 L con agua.

Disolución estándar de nitrato de plata (0.014 N). Moler aproximadamente 5.0 g de cristales de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) y secar a 100°C durante 2 hrs. Pesar aproximadamente y con precisión 2.4 g de los cristales pulverizados de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) disolverlos en aproximadamente 1 L. Valorar contra la disolución patrón de cloruro de sodio 0.014N (ver inciso siguiente).

Disolución patrón de cloruro de sodio (0.014N). Secar aproximadamente 3.0 g de cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) a 140°C. Pesar aproximadamente y con precisión 824.1 mg de la sal seca disolver en agua y aforar a 1 L en un matraz volumétrico. Se acepta

---

<sup>1</sup> Una medida de la pureza iónica del agua. Es su resistividad, que es el recíproco de la conductividad del agua. Entre menor cantidad de sólidos disueltos tenga el agua, mayor será su resistividad. Un megohm-cm es igual a una resistencia de 1 000 000 Ohms medida entre dos electrodos separados un centímetro. El agua "Absolutamente" pura tiene un valor teórico máximo de 18.3 megohm-cm a 25 °C.

el uso de patrón certificado. Disolución de hidróxido de sodio (0.1N). Pesar aproximadamente y con precisión 4.0 g de hidróxido de sodio (NaOH) disolver en 1 L de agua.

Disolución de ácido sulfúrico (0.1N). Tomar cuidadosamente 3 ml de ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ) y llevar a 1 L.

Suspensión de hidróxido de aluminio. Pesar aproximadamente y con precisión 125.0 g de sulfato de aluminio y potasio o sulfato de aluminio y amonio, y llevar a 1 L con agua. Calentar a 60 °C y añadir 55 ml de amoniaco ( $NH_3$ ) lentamente y agitando. Permitir reposar la disolución durante unas horas, decantar el agua sobrenadante y lavar el precipitado por adiciones sucesivas de agua, mezclando bien y decantando. Repetir el procedimiento anterior hasta eliminar el olor a amoniaco. Cuando está recién preparada, la suspensión ocupa un volumen aproximado de 1 L.

## PROCEDIMIENTO

### Acondicionamiento de la muestra

Utilizar un volumen de muestra de 100 ml. Ajustar el pH entre 7 y 10 utilizando las disoluciones de hidróxido de sodio (0.1N) y/o ácido sulfúrico (0.1N).

Si la muestra tiene mucho color, añadir de 3 ml a 5 ml de la suspensión de hidróxido de aluminio antes de acondicionar. Mezclar, dejar sedimentar y filtrar con papel filtro cualitativo.

### Valoración

A 100 ml de muestra acondicionada, adicionar 1 ml de disolución indicadora de cromato de potasio. Valorar con la disolución patrón de nitrato de plata hasta el vire de amarillo a naranja rojizo, manteniendo un criterio constante en el punto final.

Titular un blanco con las muestras.

## CÁLCULOS

Calcular la concentración de iones Cloruro en la muestra original, en mg/L como sigue:

$$\text{Cl}^- \text{ mg /L} = [(A - B) \times N \times 35.450] / \text{ ml de muestra} \quad (\text{ecuación 12})$$

donde:

A son los ml de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración de la muestra;

B son los ml de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración del blanco.

N es la normalidad del nitrato de plata.

Todos los valores obtenidos de control de calidad deben ser reportados junto con los resultados del análisis.

Reportar los resultados en Cl mg/L, con la precisión correspondiente.