



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE BIOLOGÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**“Determinación de la factibilidad para valorizar los residuos de
aguacate, evaluando su biodegradabilidad a partir de un
análisis termogravimétrico.”**

TESIS

que para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

presenta:

JANIK YUNUEN AYUNGUA GUTIÉRREZ

Ingeniera en Energía

Director de tesis:

Dr. OTONIEL BUENROSTRO DELGADO

Co-Director de tesis:

Dr. ROBERTO GUERRA GONZÁLEZ

Morelia, Michoacán, febrero del 2021

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento va dirigido a Dios, quién me ha dado la oportunidad de concluir una nueva etapa académica, ha forjado mi camino y está conmigo ayudándome a superar nuevos retos.

Agradezco a mis padres, Karime y Francisco, por jamás dejarme sola y apoyarme en cada decisión de mi vida, los amo con todo mi corazón y cada paso seguro que doy, así como cada logro que tengo es por y para ustedes, es un placer ser su hija.

Agradezco a mis suegros, Eréndira y Manolo, que siempre me han apoyado, brindándome su amor, tiempo y confianza. Gracias por hacerme sentir como una hija más, los quiero mucho.

Agradezco a mi esposo, Manolo, que me dedicó su amor y comprensión para concluir con este trabajo, me motiva y siempre me hace confiar en mí misma. A nuestro bebé, Manuel Alejandro, en quien encontré la motivación necesaria para impulsarme en cada paso de este trayecto. Este es uno de los muchos logros que le pertenecen a nuestra nueva familia.

Agradezco a mis asesores, el Dr. Otoniel Buenrostro y el Dr. Roberto Guerra, que tuvieron siempre palabras de motivación adecuadas y me compartieron su conocimiento, así como apoyo incondicional para el desarrollo de este trabajo.

Agradezco a mis compañeros, con los que compartimos momentos invaluables y me mostraron su apoyo al compartir experiencias en el ámbito laboral.

De manera muy especial, agradezco a los integrantes de la mesa sinodal: Dra. Ruth Alfaro, Dr. Roberto García y Dr. Marco Martínez.

¡Que Dios les bendiga abundantemente a todos!

¡Gracias!

ÍNDICE	
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE CUADROS	6
GLOSARIO	7
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1.INTRODUCCIÓN	11
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Residuos	12
<i>2.1.1 Consecuencias ambientales y sociales por la disposición inadecuada de los residuos.</i>	13
2.2 Tipos de residuos sólidos	14
<i>2.2.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)</i>	14
<i>2.2.2 Residuos de Manejo Especial (RME)</i>	18
<i>2.2.3 Residuos Peligrosos (RP)</i>	19
2.3 Uso excesivo de hidrocarburos y energía limpia	20
2.4 Desarrollo sostenible	21
2.5 Energías Renovables	22
2.6 Biomasa	24
2.7 Tipos de biomasa	26
<i>2.7.1 Composición de la biomasa lignocelulósica</i>	28
2.8 Aprovechamiento energético de la biomasa	30
<i>Fuente: (Giraldo et al., 2015).</i>	32
2.9 Procesos de conversión para el tratamiento de la biomasa	32
<i>2.9.1 Procesos Termoquímicos</i>	33

2.10 Análisis Termogravimétrico	35
2.11 Análisis IR	36
2.12 Análisis DRX.....	37
3. ANTECEDENTES	38
4. JUSTIFICACIÓN	41
5. HIPOTESIS	43
6. OBJETIVOS.....	43
6.1 <i>Objetivo General</i>	43
6.2 <i>Objetivos Específicos</i>	43
7. METODOLOGÍA	44
7.1 Recolección de las muestras de residuo	44
7.2 Preparación de la muestra para análisis de laboratorio	46
7.3 Análisis físicoquímicos	46
7.4 Procesos de conversión de la biomasa	49
7.5 Análisis estadístico de los datos	50
8. RESULTADOS.....	51
8.1 Recolección de las muestras del residuo	51
<i>Fuente: Elaboración propia</i>	51
8.2 Preparación de la muestra para análisis de laboratorio	51
8.3 Análisis físicoquímicos	52
8.4 Análisis del proceso de conversión de la biomasa	53
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	60
10. CONCLUSIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación global de residuos por región, 2010.....	16
Figura 2. Generación de RSU, producto interno bruto (PIB) y gasto del consumo final privado en México, 2003-2015. Fuente: Tomado de (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México., 2016).....	17
Figura 3. Generación regional de RSU, 2012.....	17
Figura 4. Generación de RME en México, 2006-2012.....	19
Figura 5. Distribución del aprovechamiento de las distintas fuentes de bioenergía. Fuente: Modificado de (Rincón Martínez & Silva Lora, 2014).	24
Figura 6. Formación de la biomasa. Modificado de (Giraldo et al., 2015).....	26
Figura 7. Estructura molecular de la celulosa. Fuente: Tomado de (Giraldo et al., 2015).....	29
Figura 8. Estructura molecular de una hemicelulosa típica, xilano. Fuente: Tomado de (Giraldo et al., 2015).....	29
Figura 9. Unidades de la estructura molecular de la lignina. Fuente: Tomado de (Giraldo et al., 2015).....	30
Figura 10. Procesos de conversión de energía de acuerdo al porcentaje de humedad contenida en la biomasa. Fuente: Modificado de (Giraldo et al., 2015). 33	
Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 12. Recolección de muestra en banda mecánica de residuos.	45
Figura 13. Almacenamiento del residuo recolectado.....	45
Figura 14. Peso de residuos.....	45
Figura 15. Muestra molida para análisis fisicoquímicos.....	52
Figura 20. Curvas de TGA a la degradación térmica de la cáscara de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Analizador termogravimétrico TA TGA Q500 (TA Instruments, USA).	54

Figura 21. Curvas TGA a la degradación térmica de la semilla de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Analizador termogravimétrico TA TGA Q500 (TA Instruments, USA).	54
Figura 22. Curvas TGA a la degradación térmica de la mezcla del residuo de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Analizador termogravimétrico TA TGA Q500 (TA Instruments, USA).	55
Figura 23. Análisis de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier para la cáscara del aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Espectrómetro Bruker Tensor-27.	56
Figura 24. Análisis de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier para la semilla del aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Espectrómetro Bruker Tensor-27.	56
Figura 25. Análisis de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier para la mezcla de los residuos de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Espectrómetro Bruker Tensor-27.	57
Figura 26. Análisis de difracción de rayos X para la cáscara del aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO.	58
Figura 27. Análisis de difracción de rayos X para la semilla del aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO.	58
Figura 28. Análisis de difracción de rayos X para la mezcla del residuo de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO.	59

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estimación de la generación de RP en México, 2015.....	20
Cuadro 2. Rango de temperatura para la descomposición de los componentes lignocelulósicos.	30
Cuadro 3. Características de la biomasa para su aprovechamiento energético...	31
Cuadro 5. Técnicas de caracterización para los procesos de conversión de biomasa. Fuente: Elaboración propia.....	49
Cuadro 4. Pesos de las bolsas recolectadas de residuo.....	51
Cuadro 6. Parámetros químicos de los residuos (%).	52
Cuadro 7. Parámetros fisicoquímicos de los residuos de guacamole.....	52
Cuadro 8. Determinaciones de parámetros lignocelulósicos.....	53
Cuadro 9. Cuadro comparativo del análisis bromatológico de los residuos de las variedades de aguacate (base seca).	61
Cuadro 10. Cuadro de identificación de frecuencias y asignaciones correspondientes al espectro FTIR en residuos de aguacate.	63

GLOSARIO

Aguacate Hass: También conocido como *Palta Hass*, es una variedad de la fruta *Persea americana*, siendo una de las variedades más comunes de aguacate en el mercado.

Biocombustibles: Combustibles no fósiles. Son portadores de energía que almacenan la energía derivada de materias orgánicas (biomasa), incluso materias vegetales y excrementos animales.

Bioenergía: Energía renovable producida a partir de materiales biológicos.

Confinamiento de residuos: Lugar totalmente seguro e higiénico con el propósito de recibir cierto tipo de residuos, evitando la contaminación de los posibles lugares afectados.

Contaminación: Presencia o acumulación de sustancias en el medio ambiente que afectan negativamente el entorno y las condiciones de vida, así como la salud o la higiene de los seres vivos.

Biodegradación: Descomposición natural y no contaminante de una sustancia o producto por la acción de agentes biológicos.

Desarrollo sustentable: Consiste en la administración eficiente y responsable de los recursos naturales para preservar el equilibrio ecológico, a fin de garantizar la distribución equitativa de tales recursos en el presente y su disponibilidad para las generaciones futuras.

Energía renovable: Energía que utiliza los recursos inagotables de la naturaleza, como la biomasa, las radiaciones solares o el viento.

Mejorador de suelos: Enmiendas del suelo que mejoran la estructura del suelo al aumentar la aireación, la capacidad de retención de agua y los nutrientes. Pueden ser orgánicos o inorgánicos, o una combinación de materia sintética y natural.

Pecuario: Del ganado o de la ganadería, o relacionado con ellos.

Proceso fotosintético: Proceso por el cual la energía de la luz se convierte en energía química en forma de azúcares, a partir de agua y dióxido de carbono, mientras se libera oxígeno como subproducto.

Valorización económica: Estima el valor en términos monetarios de los cambios en los bienes y servicios a través de los cambios en el bienestar de la sociedad. Expresando la importancia económica que un bien o servicio pueda tener.

RESUMEN

Los residuos de aguacate presentan un fuerte problema ambiental por su disposición inadecuada y el nulo tratamiento que se le da a este residuo. En el presente trabajo se realizó un análisis termogravimétrico (ATG) que permitió encontrar la cantidad de energía expresada en calor para determinar las rampas de calentamiento en donde se degrada el residuo de aguacate, realizando una caracterización fisicoquímica y bromatológica del residuo. El residuo se separó en tres muestras: cáscara, semilla y mezcla (combinación de cáscara y semilla). Para las tres muestras la temperatura inicial de degradación oscila en los 200°C y varía en 100°C entre la cáscara y la semilla. Entre la cáscara y la mezcla varía de 50°C y 300°C para la primera y segunda rampa de calentamiento. De igual manera, para las tres muestras se detectó una degradación cercana al 90% del residuo a los 750°C. Por otro lado, por medio de la espectroscopía infrarroja (IR), se identificaron dos grupos funcionales para las tres muestras: anhídros y alcanos. Por último, se realizó un análisis de difracción de rayos X (DRX), en donde no se detectaron elementos inorgánicos, sugiriendo que los residuos de aguacate resultan óptimos para ser valorizados como mejorador de suelos, alimento pecuario o bien, algún biocombustible.

PALABRAS CLAVE

Degradación, termogravimetría, espectroscopía, difracción rayos X y valorización.

ABSTRACT

The avocado wastes are a critical environment problem because of the improper disposal and the null treatment to this waste. In this study a thermogravimetric analysis (TGA) was carried out, which allowed finding the amount of energy expressed in heat to determinate the heating ramps where the avocado waste is degraded, performing a physicochemical and bromatological characterization of avocado waste. The waste was separated in three samples: shell, seed and mixture (shell and seed combination). The initial temperature of degradation was 200°C for the three samples, varying by 100°C between shell and seed. For the shell and seed, varies from 50°C and 300°C, for the first and second heating ramps. Similary, for the three samples, a degradation close to 90% of the residue was detected at 750°C. In other hand, by infrared spectroscopy (IR), two functional groups were identified for the three samples: anhydrides y alkanes. Last of all, X-ray diffraction analysis (XRD) was performed, where no inorganic elements were detected, suggesting that avocado wastes fit conditions for valorized as a soil improver, livestock feed or some biofuel.

KEY WORDS

Degradation, thermogravimetry, spectroscopy, X-ray diffraction, and valorization.

1.INTRODUCCIÓN

El incremento de la demanda de recursos naturales para sostener una población es inevitable a medida que la misma crece, en México en el 2018, existían 125 millones de habitantes (ENADID, 2020) y se estima que para el 2050 habrá una población de 148.2 millones (SEMARNAT, 2019), y esa adición de personas demandarán recursos naturales para satisfacer sus respectivas necesidades. Todo tipo de actividad relacionada a la demanda de recursos, ya sea económica como de producción y consumo de bienes y servicios, genera una fuerte cantidad de residuos, que, si no se manejan de manera adecuada, pueden terminar impactando fuertemente al medio ambiente.

Una de las principales y esenciales actividades de los seres humanos es la producción de alimentos, donde el 93% de los residuos generados por la industria alimentaria son residuos orgánicos que se generan al procesar diferentes tipos de frutas y verduras (González *et al.*, 2014). Dependiendo del tipo de industria, se generan, residuos sólidos: cáscaras, semillas, huesos, como líquidos: suero, agua de desecho o gaseosos por los diferentes procesos dependiendo la industria.

México se caracteriza por ser el principal exportador del sector agroalimentario del mundo en productos como el tequila, tomate, frutos rojos, azúcar de caña, chiles, pimientos, pepino, limón, cebolla, papaya y aguacate, entre otros (Miranda, 2019), y como consecuencia, la producción de cada uno de estos productos ha ido en aumento año con año, y no sólo se exportan como frutos enteros, sino que ahora se exportan ya procesados, por ejemplo, el aguacate. En el 2008, el 5% de los aguacates eran destinados para ser procesados, principalmente como guacamole, lo que generaba aproximadamente 20 000 toneladas de residuos, considerando que la producción de guacamole aumenta en relación con el incremento de la cosecha de aguacate, podemos asumir que la cantidad de residuos orgánicos como resultado de procesar dicha fruta, también se ha incrementado.

El exceso de estos residuos se puede convertir en un fuerte problema ambiental si no son tratados de manera adecuada, es por eso que es necesario conocer de manera detallada dicho residuo para encontrar la mejor tecnología para procesarlos y si es posible, valorizarlo económicamente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Residuos

De acuerdo con Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los residuos se definen como los materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, que se contienen en recipientes o depósitos, y que necesitan estar sujetos a tratamiento o disposición final con base en lo dispuesto en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003).

El desarrollo de todas las ciudades, asentamientos humanos y sus respectivas actividades; como el consumo de bienes y servicios, generan obligatoriamente, diversos tipos de residuos. Los residuos generados pueden encontrarse en cualquiera de los tres estados físicos de la materia: sólidos (con naturaleza orgánica o inorgánica), líquidos (los que se vierten disueltos en las aguas residuales) y aquellos que se desprenden en forma de gases. Estos residuos afectan de manera específica al ambiente, tomando en cuenta la composición, tasa de generación y manejo se pueden generar diversas consecuencias adversas al ambiente y a los seres humanos, sobre todo si contienen compuestos tóxicos, no se tiene un buen cuidado con su manejo o, se drenan de forma accidental o a propósito, al suelo o en algún ambiente acuático (SEMARNAT, 2016).

El tema de la generación y manejo de los residuos afecta directamente al ambiente y a la salud pública, por ende, se relaciona con el uso de los recursos naturales. Debido a esta relación es necesario implementar planes que involucren la gestión integral de los residuos, en dónde además de minimizar la generación y llevar a cabo una correcta disposición final, se busque reducir el uso de recursos naturales, consumos excedentes de energía y la disminución de gases de efecto invernadero. Este tipo de planes tienen como objetivo preservar el medio ambiente, así como beneficios económicos, y sociales (SEMARNAT, 2016).

Con respecto a los residuos sólidos, México genera más de 44 millones de toneladas anuales y se prevé que este número alcance 65 millones para el año 2030. (SEMARNAT, 2019). Existen diversos aspectos que afectan al correcto tratamiento y manejo de los residuos sólidos, así como los órdenes de

responsabilidad otorgados: los residuos sólidos urbanos (RSU), son gestionados por los municipios, los residuos de manejo especial (RME), son responsabilidad de las autoridades estatales; y los residuos peligrosos (RP), son de atención federal. Adicionado a esta barrera para la correcta gestión de los residuos, en el país hay 143 municipios que no cuentan con ningún servicio de recolección de residuos; y de acuerdo a datos del INEGI en el 2010, se enlistan 238 rellenos sanitarios en los que se dispone el 70% de los (RSU) generados, en 1,643 tiraderos a cielo abierto, se dispone el 25% y del resto, 5%, son materiales que se valorizan; sin mencionar que en la mayoría de los rellenos sanitarios, no cumplen con las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2004) y presenta, un riesgo inminente a la salud de la población y del medio ambiente.

2.1.1 Consecuencias ambientales y sociales por la disposición inadecuada de los residuos.

El aumento de los residuos es dependiente del aumento de población en alguna región en específico, ya que se aumentan los servicios y, por ende, las actividades en esa zona. Debido a este incremento es necesario plantear planes que permitan la recolección, manejo y disposición final de los residuos. De acuerdo con el Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (SEMARNAT, 2016), uno de los temas con mayor importancia por el grado de afectación, tiene que ver con su adecuado confinamiento, para evitar que en los sitios en los que se depositen estos residuos se conviertan en focos de contaminación en infecciones, y logre asegurarse que no serán dispersados.

Existen diversos factores de riesgo que deben ser considerados al momento de crear planes de manejo para el correcto confinamiento de los residuos. Uno de los factores es la generación de biogás; que es una mezcla de metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), otros gases producidos son el nitrógeno (N_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2), que, aunque se generan en cantidades muy pequeñas, pueden causar grandes afectaciones al ambiente de acuerdo a la concentración y alterar el medio. También se puede encontrar en cantidades traza, monóxido de carbono (CO), amoníaco (NH_3), hidrocarburos aromáticos y algunos compuestos orgánicos volátiles; ya que los sitios de

disposición de residuos sólidos son fuentes importantes de generación de estos gases de efecto invernadero (GEI) (SEMARNAT, 2016).

Otro factor importante, es la contaminación de los suelos y de los cuerpos de agua, ya que muchos de los residuos generan líquidos durante el proceso de descomposición a los cuáles se les denomina como lixiviados. La composición de los lixiviados varía de acuerdo con la composición y el tiempo de confinamiento de los residuos sólidos. Los lixiviados contienen sustancias orgánicas e inorgánicas como los metales pesados, y la cantidad en la que se presentan y la velocidad en la que se descompongan genera un riesgo para el suelo y los cuerpos de agua, ya sean superficiales o subterráneas; generando problemas de toxicidad, eutroficación y acidificación (SEMARNAT, 2016).

Y, por último, pero no menos importante, es la proliferación y transmisión de enfermedades, ya que los residuos acumulados pueden servir como fuente de alimentación y refugio de diversos organismos, los cuáles pueden presentar un riesgo para el ser humano, por ejemplo; las moscas, cucarachas, pulgas y mosquitos pueden ser vectores de enfermedades como diarrea, tifoidea, paludismo, giardiasis y dengue. Las ratas pueden diseminar peste, tifus y leptospirosis, por este tipo de consecuencias, es que un plan de manejo de residuos debe considerar todos estos factores para llevar a cabo la mejor manera para confinarlos (SEMARNAT, 2016).

2.2 Tipos de residuos sólidos

Los residuos sólidos se clasifican de acuerdo a sus características y orígenes en tres grupos principales; residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP), (DOF, 2003).

2.2.1 Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Este tipo de residuo engloba a todos aquellos que son generados en las casas habitación como resultado de las actividades domésticas; residuos de los productos de consumo, envases, empaques, residuos orgánicos; también residuos de

actividades en establecimientos, de la vía pública, y siempre que no sean considerados de otra índole (DOF, 2003).

La generación mundial de RSU se calculó cerca de 1 300 millones de toneladas diarias en el 2012, eso permite una estimación para el año 2025, de 2 200 millones de toneladas diarias por año. Dentro de esta generación se puede observar un contraste regional de acuerdo a su volumen, para lo cual se considera que el desarrollo económico y la proporción de la población urbana lo ha provocado (SEMARNAT, 2016).

En la figura 1 se muestra que el 44% de los RSU producidos en el planeta correspondieron a los países con las economías más desarrolladas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y los países de Latinoamérica y del Caribe contribuyeron con el 12% del total. De acuerdo a datos del 2015, en México la generación de RSU fue de 53.1 millones de t; expresado per cápita, se generaron 1.2 kilogramos diariamente durante el mismo año. Este aumento tan drástico de la generación de residuos pudo ser ocasionado por diversos factores, entre los más importantes fueron el crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas y cambio en los patrones de consumo de la población (SEMARNAT, 2016).

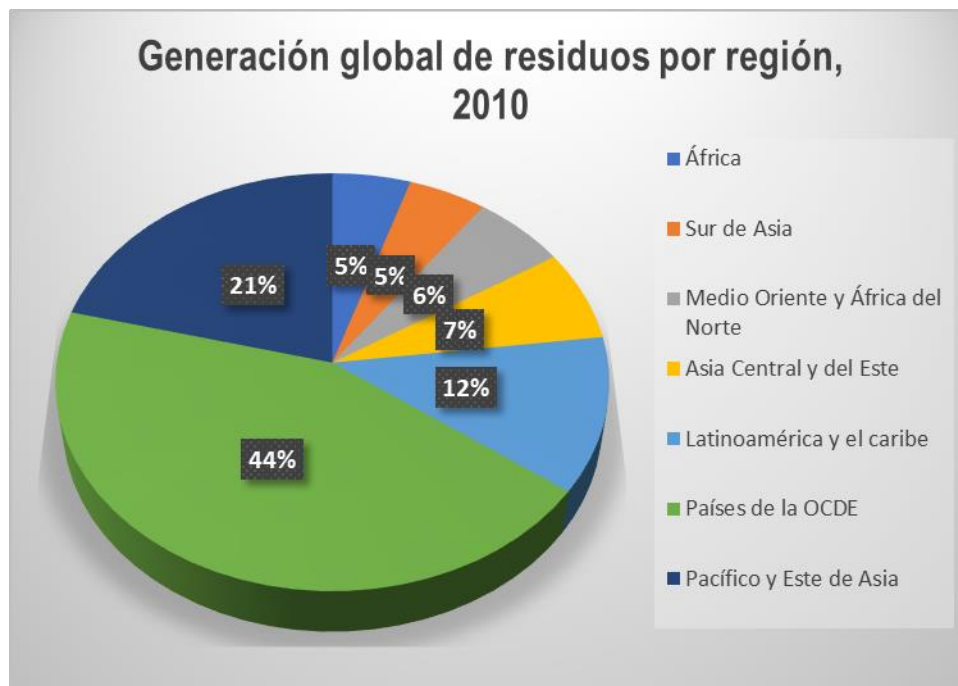


Figura 1. Generación global de residuos por región, 2010.

Fuente: Modificado de (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México., 2016).

En México existe una relación entre los niveles de consumo y la producción de RSU, siendo el mismo caso de muchos otros países, donde el crecimiento de la generación de residuos va de la mano con el consumo final privado y el PIB nacional. En la figura 2, podemos observar que, para México, del 2003 al 2015, el producto interno bruto (PIB) y la generación de residuos crecieron prácticamente a la misma tasa, cerca de 2.77% anual (SEMARNAT, 2016).

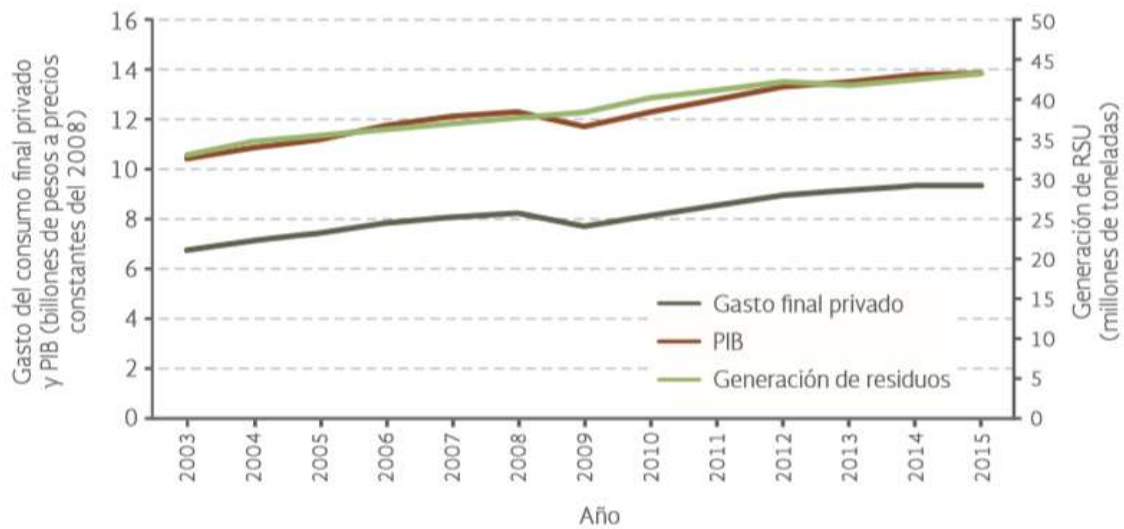


Figura 2. Generación de RSU, producto interno bruto (PIB) y gasto del consumo final privado en México, 2003-2015. Fuente: Tomado de (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México., 2016).

La generación de RSU varía en el territorio, en México, la mayor generación de éstos, se produce en las zonas geográficas con una mayor concentración de población. La Figura 3, muestra que, en el 2012, la región centro concentró el 51% de la generación de RSU, después la región Frontera Norte con el 16.4% y el Distrito Federal con el 11.8%.

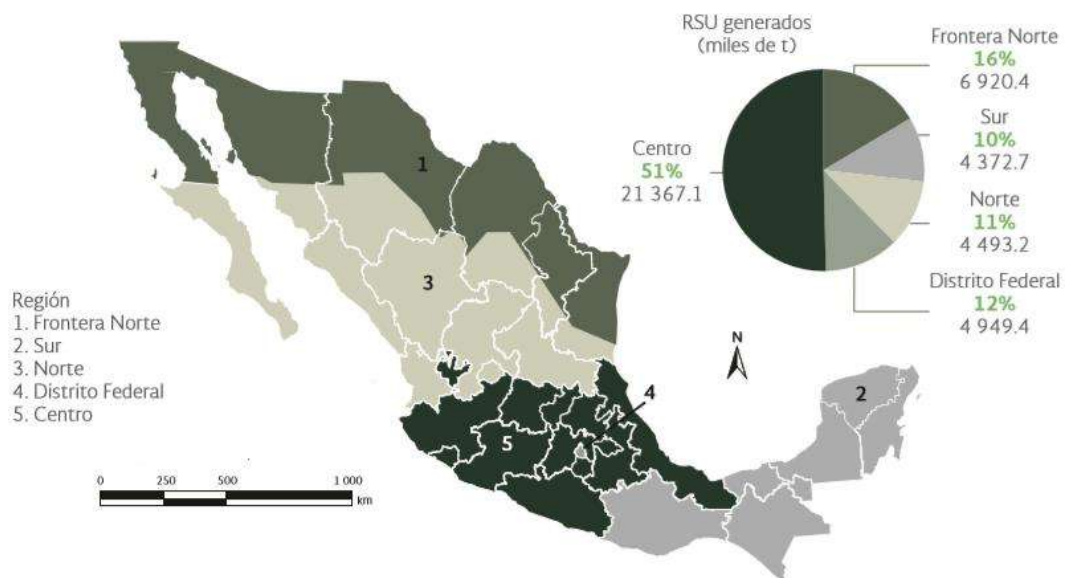


Figura 3. Generación regional de RSU, 2012.

Fuente: Tomado de (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México., 2016).

2.2.2 Residuos de Manejo Especial (RME)

Son aquellos generados en los procesos productivos o de servicios y que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o residuos peligrosos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos (SEMARNAT, Gobierno de México, 2017).

De acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, los residuos de manejo especial se clasifican en ocho categorías según su origen. (DOF, 2003)

- Residuos de rocas o productos de descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin.
- Los de servicios de salud generados por los establecimientos que realicen actividades médico-asistenciales, con excepción de los biológico-infecciosos.
- Residuos generados por actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades.
- Residuos de servicios de transporte, así como los generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias en las aduanas.
- Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.
- Residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes.
- Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general.
- Residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que, al transcurrir su vida útil, requieran de manejo específico.

En la Figura 4, se muestra que, en México durante el sexenio del 2006 al 2012, los volúmenes más altos de RME correspondieron a las excretas de ganado porcino y bovino lechero; 66.71 millones de t, seguido por papel y cartón; 6.82 millones de t, y en tercer lugar los residuos de la construcción y

demolición; 6.11 millones de t. Los menores aportes fueron residuos aeroportuarios; 8040 t, los electrodomésticos; 21660 t, las pilas; 33980 t, y los residuos generados por el tratamiento de las aguas residuales; 232 t (SEMARNAT, 2016).

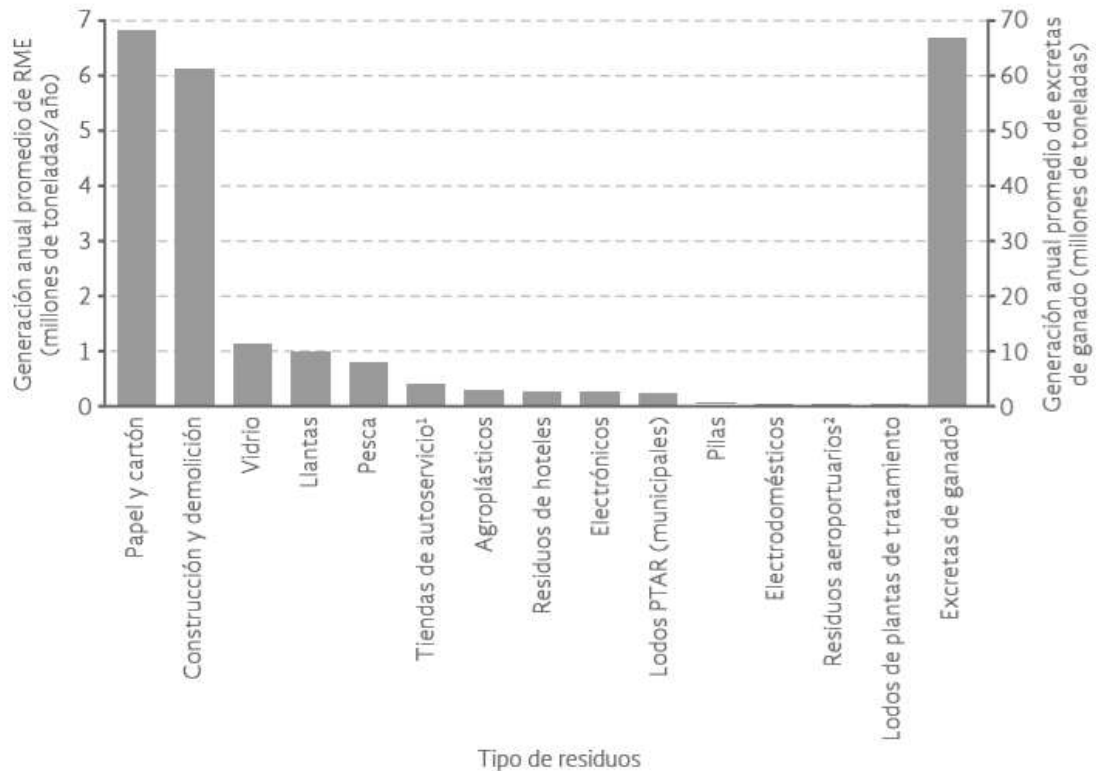


Figura 4. Generación de RME en México, 2006-2012.

Fuente: Tomado de (SEMARNAT, Informe de la Situación del Medio Ambiente en México., 2016).

2.2.3 Residuos Peligrosos (RP)

Se le conoce como residuos peligrosos a aquellos que poseen alguna de las características CRETIB que les confieren peligrosidad (corrosividad, C; reactividad, R; explosividad, E; toxicidad, T; inflamabilidad, I; o ser biológico-infecciosos, B), así como los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados, según lo que establece la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003).

En las actividades diarias de la vida cotidiana hacemos uso de diferentes sustancias químicas que permiten muchas de las comodidades con las que hoy contamos. Hasta junio de 2015, se tenía conocimiento de más de 100 millones de sustancias químicas que cumplían con diversos objetivos, entre ellos: servir de base para la fabricación de materiales, medicamentos, plaguicidas, o como intermediarios múltiples en los diversos procesos industriales. Se sabe que las sustancias químicas pueden resultar inertes o inocuas, o bien, pueden resultar particularmente peligrosas si son vertidas directa o indirectamente al ambiente, o no se tiene un cuidado especial al momento de confinarlo. Con la finalidad de identificar sustancias químicas que potencialmente pudieran representar un riesgo al medio ambiente, se aplican criterios como: la persistencia, la bioacumulación y la toxicidad.

El aumento de población y actividad industrial, son de los causantes del incremento en la generación de RP, ya que en muchos países se ha llevado un mal manejo de muchas de estos residuos, lo que ha incrementado la exposición a la población y a los diversos ecosistemas.

Cuadro 1. Estimación de la generación de RP en México, 2015.

Periodo	Generación estimada (millones de toneladas)	Número de empresas
2004-2009	1.7	52 784
2004-2011	1.92	68 733
2004-2012	1.96	75 562
2004-2013	2.04	84 279
2004-2014	2.19	93 366

Fuente: Modificado de (SEMARNAT, 2016)

2.3 Uso excesivo de hidrocarburos y energía limpia.

Los hidrocarburos por su propia cuenta no generan algún tipo de impacto ambiental, es hasta que estos son utilizados como combustibles o dentro del proceso de extracción, que generan fuertes afectaciones al ambiente. Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados únicamente por átomos de carbono e hidrógeno. Hace ya más de 150 años que son utilizados por motores de combustión interna, produciendo gran potencia que permite realizar nuestras actividades diarias de manera más holgada. Como resultado de la quema de hidrocarburos o combustibles fósiles, se produce monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂),

resultando perjudicial para nuestro medio ambiente, ya que estos se elevan a la atmosfera y contribuyen al efecto invernadero. Las energías renovables resultan una buena alternativa para minimizar el impacto ambiental, haciendo énfasis en la bioenergía como una solución entre el uso de combustibles fósiles y las energías limpias. La bioenergía, a pesar de emitir CO₂, no incrementa su concentración atmosférica, debido a que disminuye la demanda de hidrocarburos (Méndez *et al.*, 2020).

2.4 Desarrollo sostenible

Los preceptos del desarrollo sostenible que implican la necesidad de preservar los recursos naturales han fomentado el desarrollo de nuevas tecnologías en las que sus aplicaciones nos permitan saciar las necesidades energéticas demandadas. La energía se define como la causa capaz de producir un trabajo (Wark, 2001). De acuerdo con la primera Ley de la termodinámica, la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma, por tanto, no se puede hablar de energía consumida cuando en realidad es la energía utilizada para obtener otra forma de energía; en este caso toda la energía que se usa a diario en actividades antropogénicas genera energía química y térmica, las cuales también contribuyen al calentamiento global; así también la energía utilizada en los diversos procesos industriales genera contaminación térmica, y no sólo eso, los residuos que éstas industrias generan pueden ser: RSU, RMP y RP, y necesitan ser tratados conforme a la normativa estipulada, para generar el menor daño posible al ambiente.

Todos los procesos industriales necesitan una fuente de energía para poderse llevar a cabo, ya sea; elevar la temperatura de algún líquido, generar calor para el proceso o simplemente poder trabajar con los diversos equipos eléctricos. La mayoría de las industrias trabajan con combustibles fósiles, y llevan haciéndolo de esa manera desde hace muchos años. En los últimos años, se ha estudiado más a fondo otras alternativas energéticas que logren cubrir la necesidad energética, y al mismo tiempo, minimicen el impacto ambiental.

Existen diversas fuentes de energía, por ejemplo; las energías renovables y las *no* renovables, esto se determina según el caso de energía por el cual se alimenten, ya sea de una fuente que se siga produciendo y su consumo sea repuesto, o que no se produzca y termine por agotarse. El tipo de energía agotable en el tiempo engloba a los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), siendo lo más contaminante como ya se menciona; pero también existen los inagotables en el tiempo que producen energía constantemente, y la energía consumida se renueva continuamente, haciéndola ilimitada. (Rincón Martínez & Silva Lora, 2014)

2.5 Energías Renovables

Las fuentes renovables de energía ayudan a minimizar problemas de contaminación, ya que son fuentes limpias que no dañan al ambiente y son recursos inagotables en el tiempo, siendo una alternativa bastante rentable para abastecer todo tipo de necesidades energéticas en el mundo, ya que se obtienen de los sistemas propios de la naturaleza, y debido a que son constantes y con un promedio de vida mayor al del ser humano, resultan ser una buena respuesta a nuestro problema con la contaminación.

El 2019, fue el año en el que se instalaron más sistemas para la producción de energías renovables en el mundo, según un informe elaborado por la ONU (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA), las inversiones de 2019, crecieron únicamente un 1% con respecto a las de 2018, esto fue un incremento del 12% de potencia instalada con respecto al año anterior, también se reafirmaron compromisos de la puesta en marcha de instalaciones en diversos países y empresas para la próxima década, aunque no resultan como un acierto para reducir el calentamiento global. Cada vez resulta más factible instalar un megavatio de energía renovable: solar y eólica, resultando una gran oportunidad para que los gobiernos den prioridad y abran camino para la instalación de energías renovables para la recuperación económica posterior a la pandemia de Covid-19 (Barrero, 2020).

A finales de la última década, el parque de generación renovable añadió a la potencia, de manera histórica, 184,000 nuevos MW, 20,000 MW más que en el 2018, siendo así que hasta el 77.6% de toda la potencia que se puso en marcha fue renovable. Las mayores adiciones energéticas fueron por parte de la energía solar, eólica, y eólica marina (Barrero, 2020).

A pesar del incremento histórico, no es suficiente, los objetivos planteados para el 2030 se encuentran muy por debajo de lo que se requiere para frenar el cambio climático. *“Si los gobiernos aprovechan, como es debido, la disminución del costo de producción de las energías renovables y las sitúan en el corazón de la recuperación económica del Covid-19, pueden dar un paso gigante hacia un mundo de energía limpia y saludable, lo que va a constituir un mejor seguro contra las pandemias globales”*, según Jon Moore, director ejecutivo de Bloomberg NEF (Barrero, 2020).

Como ya se menciona, dentro de las energías renovables se encuentran varias de mayor interés, ya que son de más fácil uso y con menor inversión para desarrollar este tipo de tecnología; como la energía solar, la energía eólica, energía hidráulica, energía de la biomasa, etc.

Esta última, utiliza como materia prima la biomasa, que son aquellos desechos orgánicos, y consiste en aprovecharlos a través de un proceso mecánico o biológico. La biomasa puede ser un conjunto de materia biológicamente renovable (madera, células, restos de comida, etc.), y puede ser producida en un área determinada. Es un término que resalta mayormente en temas relacionados a la obtención de energía: bioenergía. En la Figura 5, se aprecia el aprovechamiento que se le puede dar a las diferentes fuentes de bioenergía.

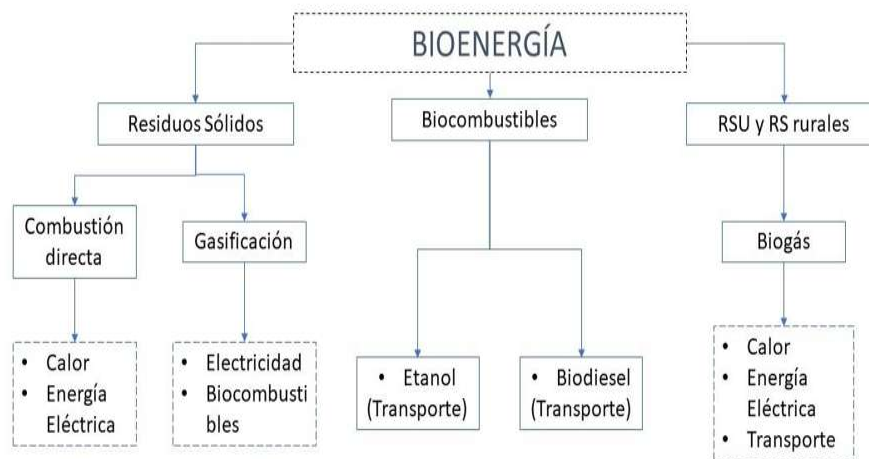


Figura 5. Distribución del aprovechamiento de las distintas fuentes de bioenergía. Fuente: Modificado de (Rincón Martínez & Silva Lora, 2014).

2.6 Biomasa

La biomasa es la materia orgánica presente en un organismo, nivel trófico o sistema terrestre, procedente de un proceso que puede ser biológico, espontáneo o provocado y que puede ser utilizado como fuente de energía. La biomasa abarca un grupo heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza (Fernández, 2012). Hablando en el contexto energético, el término de biomasa es empleado para denominar una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por uso biológico o en un pasado inmediato e incluso, de los productos derivados de ésta. Son también considerados como biomasa, la materia orgánica que arrastran las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los RSU y tomando en cuenta las características específicas de éstos, se pueden considerar como un grupo aparte.

La biomasa se considera de carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera en el momento que se rompen los enlaces de los compuestos orgánicos durante el proceso de combustión y degradación, liberando dióxido de carbono y agua, como productos finales. Es por esto que, los productos provenientes de la biomasa utilizados para producción de

energía se consideran como biocombustibles, ya sean sólidos; los que son utilizados para fines térmicos y eléctricos, o líquidos; aquellos biocarburantes (combustibles de origen vegetal) para automoción (Fernández, 2012).

Desde el punto de vista químico, la biomasa vegetal, mejor conocida como fitomasa, es un material compuesto, formado por una mezcla de hemicelulosa, lignina y extractos, caracterizada por tener carbono, oxígeno, hidrógeno y compuestos volátiles formados por cadenas largas del tipo C_nH_m y presencia de CO_2 , CO e H_2 , concentrando así, gran parte del poder calorífico de la biomasa y constituyen los compuestos involucrados en las reacciones exotérmicas generadoras de energía, debido a lo anterior, es que la biomasa posee una considerable cantidad de energía almacenada en sus componentes orgánicos de origen vegetal y animal, así como se observa en la Figura 6 (Giraldo *et al.*, 2015).

Al momento de aprovechar energéticamente la biomasa y someterla a combustión, el aporte de gases de efecto invernadero por sus emisiones de CO_2 , es neutro, ya que no contribuye a aumentar la cantidad de CO_2 en la atmósfera, siempre y cuando exista un balance cero entre la biomasa producida por el medio natural y la usada en la producción de energía, ya que el CO_2 que se genera en la combustión es reabsorbido gracias a la fotosíntesis durante el crecimiento de las plantas, evitando así el exceso de dióxido de carbono que genera el calentamiento global, según Miltner (Miltner *et al.*, 2006).

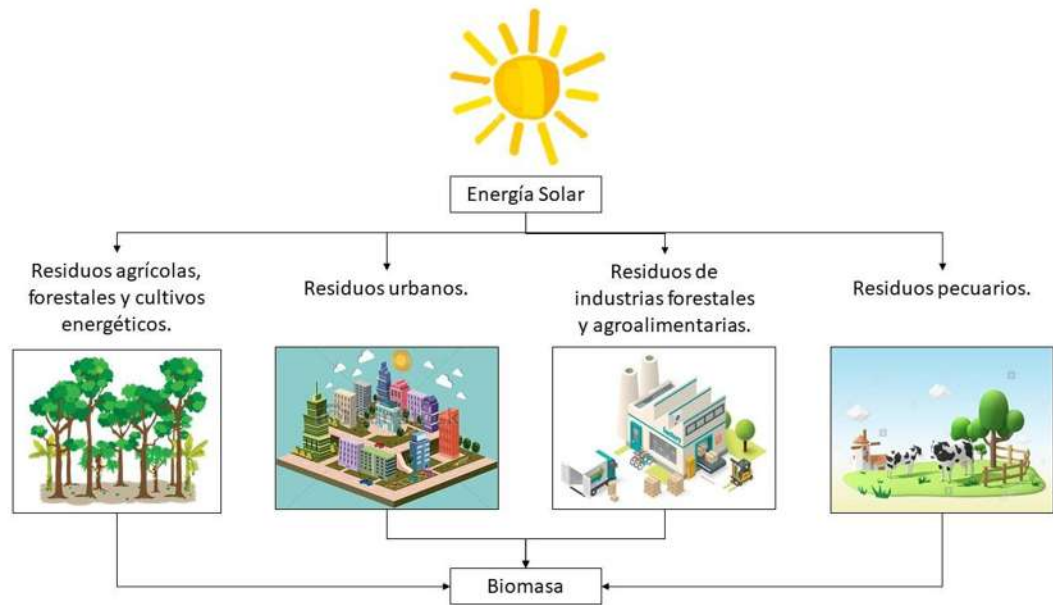


Figura 6. Formación de la biomasa. Modificado de (Giraldo et al., 2015).

2.7 Tipos de biomasa.

La biomasa está expuesta a diversas transformaciones provenientes de origen natural o actividades antropogénicas, por lo cual varían sus propiedades y procesos de obtención, así que se pueden clasificar según: la fuente de obtención, la naturaleza y su composición (Senovilla, 2005). También se puede clasificar de acuerdo al potencial energético como: biomasa húmeda y biomasa seca. Si su porcentaje de humedad está por encima del 60%, se le conoce como biomasa húmeda y biomasa seca si está por debajo del 60%.

- **Fuente de obtención**

Esto cuando la materia orgánica de las plantas sufre transformaciones, desde la descomposición en los sitios naturales para generar nutrientes elementales del ciclo de vida o por actividades del ser humano y su obtención de bienes de consumo, esto genera subproductos que pueden ser utilizados como materia prima. Este subproducto se puede clasificar como:

Biomasa Natural

Producida por procesos fotosintéticos en los ecosistemas naturales, incluyendo bosques naturales, plantas usadas como fuente de alimentación, forraje, fibra y combustible (Giraldo *et al.*, 2015).

Biomasa Residual

Obtenida del residuo de actividades pecuarias, agrícolas, forestales, industriales y domésticas; como el estiércol, residuos de origen cárnico, tallos, cáscaras, pulpas vegetales, polvos de granos secos, restos de podas, ramas, hojas, maleza, pastura. Otros también como aserrín, corteza, astillas, residuos de industrias de alimentos; productoras de aceite, aceites de semilla, productoras de vino, fábricas de cerveza, también aquellos residuos domésticos que son los generados por la población dentro de sus domicilios, en los que se incluyen las aguas residuales (Ruíz, 2013).

Cultivos energéticos

Aquellos que tienen como objetivo la producción de biomasa con características especiales para poder utilizarse como fuente de energía, sin fines alimenticios y que no resultan rentables para su aplicación alimenticia, como cereales, remolacha, caña de azúcar, cultivos acuáticos y palma africana (Ruíz, 2013).

- **De acuerdo a su naturaleza**

Asumiendo el tipo de energía en forma de combustible que se desea generar a partir de la naturaleza de la biomasa la podemos dividir en (Senovilla, 2005):

Combustibles sólidos: Leña sin procesar, briquetas, astillas, pellets, triturados finos y carbón vegetal.

Combustibles líquidos: Alcoholes, biohidrocarburos, aceites, ésteres derivados de los mismos.

Combustibles gaseosos: Gas de gasógeno, biogás e hidrógeno.

- **De acuerdo a su composición**

Dentro de la biomasa vegetal, podemos identificar compuestos químicos como lo son el grupo de los hidratos de carbono. Este grupo se comporta de manera diferente dependiendo del tipo de biomasa, permitiendo clasificarla en biomasa lignocelulósica, amilácea, azucarada, oleaginosa y laticífera (Senovilla, 2005).

Biomasa lignocelulósica: Dentro de esta biomasa, predominan los hidratos de carbono con celulosas (hemicelulosa y holocelulosa) y la lignina. Principalmente residuos herbáceos y leñosos, paja, arroz, banano y otros.

Biomasa amilácea: En este tipo de biomasa, los hidratos de carbono se encuentran como polisacáridos de reserva, como el almidón de los cereales y las papas.

Biomasa azucarada: Contiene azúcares en su mayoría, glucosa, fructuosa y sacarosa, como la remolacha o el tallo de la caña de azúcar.

Biomasa oleaginosa: Altos contenidos de aceite como las pipas de girasol.

Biomasa laticífera: Predominan principalmente los hidrocarburos y esteroides como productos específicos de su metabolismo: látex.

2.7.1 Composición de la biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica no puede ser digerida por los seres humanos y se compone de una amplia variedad de materiales como la madera y productos derivados de la misma, cultivos energéticos, productos agrícolas, productos industriales, residuos forestales, desechos de la fabricación de madera (Fernández, 2012). Este tipo de biomasa es la más abundante producida por la fotosíntesis.

La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas y se forma por los tejidos de los vegetales y que está constituida por microfibras de celulosa que forman capas recubiertas de hemicelulosa y sobre estas se deposita la lignina; de esta forma, la biomasa lignocelulósica es conformada estructuralmente por los polímeros anteriores y en menor proporción de componentes secundarios:

1. Los de bajo peso molecular, hidrosolubles o extraíbles en solventes orgánicos que se denominan extractos.

2. Materia mineral, correspondiente a las cenizas y que dependen de la especie de las cenizas (Giraldo *et al.*, 2015).

La hemicelulosa tiene una estructura amorfa y muestra ramificaciones en sus cadenas de polímeros. La lignina representa casi el 30% del carbono orgánico terrestre y proporciona tanto la rigidez como el marco estructural a las plantas. Se compone de una compleja red de moléculas aromáticas reticuladas, que inhiben la absorción de agua a través de las paredes celulares de la planta. La estructura y composición química de la lignina depende del tipo y edad de la planta que alberga la lignina (Giraldo *et al.*, 2015). En las Figuras 7, 8 y 9, se muestran las estructuras moleculares de la celulosa, hemicelulosa y lignina.

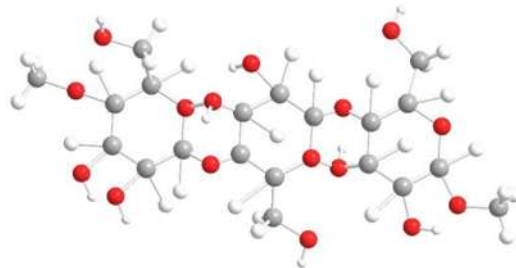


Figura 7. Estructura molecular de la celulosa. Fuente: Tomado de (Giraldo *et al.*, 2015).



Figura 8. Estructura molecular de una hemicelulosa típica, xilano. Fuente: Tomado de (Giraldo *et al.*, 2015).

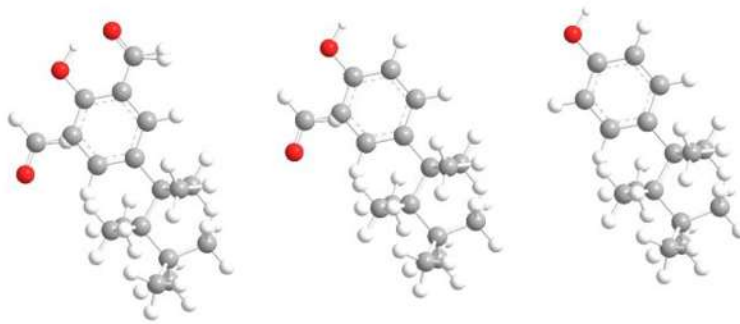


Figura 9. Unidades de la estructura molecular de la lignina. Fuente: Tomado de (Giraldo et al., 2015).

Los componentes se degradan a rangos de temperatura distintos, a continuación, en el Cuadro 2 se muestran los rangos promedio de degradación de cada componente.

Cuadro 2. Rango de temperatura para la descomposición de los componentes lignocelulósicos.

Compuesto lignocelulósico	Rango de temperatura de degradación (°C)
Hemicelulosa	225-325°
Celulosa	305-375°
Lignina	250-500°

Fuente: (Carrier et al., 2011).

De acuerdo a Carrier, se sabe que la reactividad de la celulosa es mayor que la de la lignina, lo que genera que, a mayor cantidad de celulosa, mayor cantidad de producción de volátiles (2011).

2.8 Aprovechamiento energético de la biomasa

Existen diversos procesos de conversión de biomasa para estimar su potencial energético, esto se elige de acuerdo a ciertos parámetros y condiciones, donde

también es importante evaluar factibilidades técnicas como económicas y es necesario tomar en cuenta las características mprstradas en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Características de la biomasa para su aprovechamiento energético.

Tipo de biomasa	La composición de la biomasa puede variar de acuerdo a la especie.
Composición física y química	Determinan el tipo de subproducto energético que se puede obtener a partir de la transformación de la biomasa.
Densidad aparente	Se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que se presenta bajo ciertas condiciones.
Humedad	Determina la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca e interviene en la elección del proceso de conversión de biomasa.
Distribución granulométrica	Referente a la presentación de la biomasa: rama, fardos, polvos, etc.
Análisis elemental	Establece el porcentaje en peso de los elementos químicos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica.
Análisis inmediato	Proporciona los contenidos de humedad, cenizas, sólidos volátiles y carbono fijo de la biomasa, se representan en porcentajes.

Contenido de metales alcalinos	Determina la presencia de metales que pueden catalizar o inhibir los procesos de conversión de biomasa en energía.
Poder calorífico	Determina la energía disponible en la biomasa y se relaciona directamente con el contenido de humedad.

Fuente: (Giraldo et al., 2015).

2.9 Procesos de conversión para el tratamiento de la biomasa

Los procesos de conversión de biomasa permiten transformar la biomasa en recursos energéticos secundarios aprovechables como biogás y biocombustibles, ambos pueden aprovecharse para producir energía en forma de calor, electricidad o fuerza motriz. Por otra parte, estos procesos de conversión favorecen al medio ambiente, ya que ayudan a controlar problemas de contaminación y reducir el uso excesivo de combustibles fósiles, así como minimizar el impacto por la inadecuada disposición de los residuos. *“La única fuente de energía renovable que puede ser transformada en combustibles gaseosos, sólidos o líquidos mediante procesos de conversión biológicos, fisicoquímicos y térmicos, es la biomasa.”* (Giraldo et al., 2015).

Es necesario analizar las propiedades biológicas y fisicoquímicas del residuo para poder establecer el óptimo proceso de conversión, ya que el aprovechamiento energético de la biomasa depende del contenido de humedad, poder calorífico, concentración de carbono, sólidos volátiles, contenido de cenizas y metales presentes, así como la relación entre celulosa y lignina (Carrier et al, 2011).

La biomasa posee un contenido energético menor, comparándolo con los combustibles fósiles, debido a que la relación oxígeno e hidrógeno, es mayor con respecto al carbono, por lo que la mayor cantidad de energía se almacena en las cadenas carbono-carbono (Escalante et al., 2010). El contenido de humedad es determinante para establecer el proceso de conversión, con un porcentaje menor al 60% de humedad, se aplican procesos termoquímicos y con un porcentaje mayor al

60% se llevan a cabo procesos fisicoquímicos y bioquímicos (Giraldo *et al.*, 2015). En la Figura 10 se muestran los procesos de conversión de energía de acuerdo al porcentaje de humedad contenida en la biomasa.

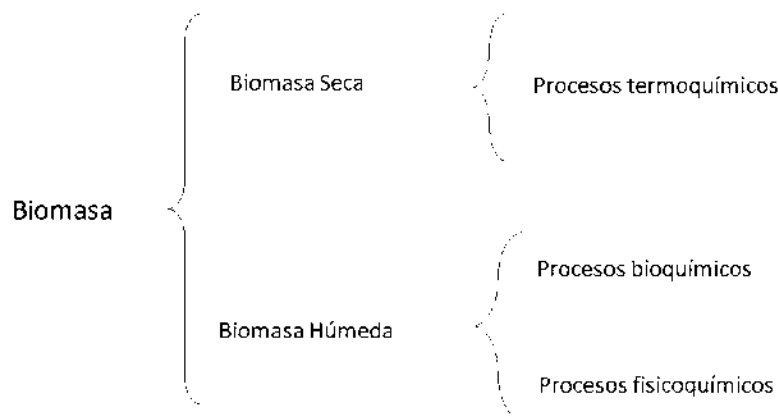


Figura 10. Procesos de conversión de energía de acuerdo al porcentaje de humedad contenida en la biomasa. Fuente: Modificado de (Giraldo *et al.*, 2015).

2.9.1 Procesos Termoquímicos

Durante este proceso, se transforma la biomasa seca a recursos energéticos en presencia de calor, obteniendo productos como combustibles en estado sólido, líquido, gaseoso o en su defecto, una mezcla de los mismos. El proceso de conversión ocurre a altas temperaturas en presencia de gases como nitrógeno, aire, hidrógeno, vapor de agua, helio, oxígeno, esto implica reacciones químicas irreversibles en condiciones variables de oxidación (Míguez, 2009).

Dentro del proceso termoquímico, cuando el calentamiento de la biomasa es llevado a cabo bajo combustión, el producto final obtenido será calor, si la combustión no es completa, el proceso que se da es la gasificación y se puede hacer uso en la línea de vapor, calor y finalmente electricidad. Por otro lado, la pirólisis, es otro proceso termoquímico que se da en la ausencia total de aire y se obtienen combustibles gaseosos, líquidos y sólidos, dependiendo de las características específicas de la biomasa y la manera en la que se maneje la misma (Míguez, 2009).

Existen diversos tipos de conversión termoquímica para tratar la biomasa, se puede dar por combustión directa, pirólisis, gasificación y licuefacción.

- **Combustión**

Es aquel proceso de conversión termoquímica en el cual la biomasa se combina con oxígeno para producir calor, se lleva a cabo a altas temperaturas y con exceso de aire estequiométrico y se obtienen como subproductos dióxido de carbono y vapor de agua. A partir de este proceso, es posible quemar la biomasa con humedad menor al 50% y se elimina por evapotranspiración (Míguez, 2009).

- **Pirólisis**

Durante este proceso, la materia orgánica es degradada por acción del calor en ausencia de oxígeno y puede ser transformada en: gases no combustibles, aceites y char o residuo carbonoso. Se desarrolla bajo un barrido continuo de gas de arrastre, puede ser nitrógeno, helio o argón, estos proporcionan una atmósfera inerte para que la biomasa se puede descomponer y los sólidos volátiles puedan ser retirados (Giraldo *et al.*, 2015).

- **Gasificación**

Proceso por el cual un material líquido o sólido, se convierte en un gas combustible, conocido como gas de síntesis o Syngas, está compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono. Este gas aumenta el poder calorífico del combustible, eliminando compuestos como nitrógeno o el agua; evitando que, durante la quema se emitan a la atmósfera en forma de contaminantes, reduciendo la tasa de carbono-hidrógeno en el combustible (Ruíz, 2013). La temperatura es un factor determinante para la eficiencia de la mezcla gaseosa, es necesario aplicar un valor mínimo de 700-800 °C; y para evitar problemas técnicos que se llegaran a presentar por la fusión y aglomeración, se establece una temperatura máxima entre 800-1500 °C (Míguez, 2009).

Esta técnica se considera como una técnica limpia para disposición final de residuos, debido a que representa una tecnología importante para el desarrollo en

el área de energías renovables (Ruíz, 2013). El gas que se obtiene, genera aplicaciones prácticas en la combustión de motores de combustión interna y turbinas de gas, para la generación de energía mecánica y eléctrica (Giraldo *et al.*, 2015).

- **Licuefacción**

Proceso de conversión en el cual, las moléculas constituyentes de la biomasa se descomponen en moléculas líquida de menor tamaño. Este proceso se da a temperaturas menores, en comparación de los otros procesos, entre 250-330 °C, para evitar la evaporación del combustible resultante. Durante el proceso, la biomasa es convertida a un combustible líquido mientras interacciona con el agua a altas presiones, 12-20 MPa, durante un tiempo determinado. Como resultado, el gas se compone en su mayoría por Metano (95%), Etano (2-6%), CO₂ (0-2%), Propano (0-2%) y Nitrógeno (0-1%) (Ruíz, 2013; Toledo, 2008).

2.10 Análisis Termogravimétrico

Para desarrollar un proceso de pirólisis adecuado y conocer los niveles de temperatura y velocidad de calentamiento adecuados, es necesario realizar un estudio de la descomposición térmica de la biomasa a través de un análisis termogravimétrico.

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica que se utiliza en el estudio de las reacciones de descomposición de biomasa lignocelulósica, donde se determina características de la volatilización y parámetros como la energía de activación, influencia de la temperatura, velocidad de calentamiento, las reacciones de descomposición térmica y mecanismos de reacción (Manals *et al.*, 2011).

Es común obtener la distribución de los productos y el desarrollo de los procesos de termoconversión por dos métodos:

1. La curva de pérdida de masa o mejor conocida como la curva termogravimétrica.

2. La dinámica de formación de los productos en reactores de pirólisis en pequeña escala.

Un análisis térmico se define como un grupo de técnicas en la cual una propiedad de una muestra es monitoreada con relación al tiempo o temperatura, en una atmósfera específica, a un régimen programado de temperatura (White, 2011), esto se basa en los diversos cambios de masa como resultado de una variación de temperatura durante un tiempo definido, los cambios de masa que se observan, permiten identificar las condiciones en las que se degradan los materiales y estos resultados se muestran en termogramas, representando gráficamente las variaciones porcentuales de la masa (Rodríguez *et al.*, 2012).

2.11 Análisis IR

La espectroscopia infrarroja se rige por el principio de la radiación electromagnética interactuando con la materia. En el momento que un material sólido es iluminado con radiación monocromática emitida por algún instrumento de espectroscopía infrarroja, esta radiación incidente se refleja por la superficie exterior, viajando al interior de los tejidos de la muestra, reflejándose nuevamente a través de toda la muestra, para perderse como refracción interna y terminar dispersándose. En este análisis, el objetivo principal es determinar la reflexión y transmisión difusa (Acuña *et al.*, 2007).

Algunas de las ventajas de la espectroscopía infrarroja son las siguientes:

- No requiere preparación de la muestra.
- La muestra puede presentarse en estado sólido, líquido, pastoso, suspensión o gaseoso.
- La muestra no se destruye al término del análisis.
- El análisis puede ser aislado o en línea dentro de un proceso dinámico.
- El proceso de análisis es rápido, económico y no hace uso de disolventes contaminantes.
- El análisis puede desarrollarse de manera cualitativa o cuantitativa.

En los últimos años se ha desarrollado la espectroscopia infrarroja a través de la Transformada de Fourier, (FT-IR), dándole a la técnica un gran poder y rapidez en

el análisis, basándose en la vibración molecular y ofreciendo así, muchas posibilidades en el análisis de compuestos de origen biológico (Castorena *et al.*, 2011).

2.12 Análisis DRX

Para la Difracción de Rayos X, sabemos que se basa en las interferencias ópticas que se producen cuando una radiación monocromática atraviesa una rendija de espesor comparable a la longitud de onda de la radiación. Es un método no destructivo para analizar diversos materiales, incluyendo líquidos, metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, etc., donde su aplicación fundamental es la identificación cualitativa de la composición mineralógica de una muestra cristalina (Berman, 2011).

3. ANTECEDENTES

González-Fernández (2015), considera que la utilización de desechos orgánicos para mejorar los suelos puede reducir la contaminación ambiental relacionada con la eliminación de desechos al tiempo que mejora la sustentabilidad de la producción de cultivos, como desecho orgánico se pueden utilizar los residuos generados por el proceso de producción de guacamole. Determina la viabilidad de hacer composta a través de los residuos de guacamole (GR) en conjunto con residuos de poda de jardín (PW) como agente de carga. González determina tres proporciones GR:PW, 2:1, 1:2 y 1:7, en los tres se siguió la evolución de la consistencia, temperatura, materia orgánica, proporción C/N durante siete meses. Después de tres meses de tiempo de curación a parte de los anteriormente indicados, la composta fue tamizada a menos de 10 mm y con la ayuda de ciertos criterios fue determinada la calidad de esta. La proporción 1:2 pareció ser la más adecuada para combinar una mejor evolución del proceso y la máxima proporción de residuos de guacamole a excepción de su elevado pH que limita su uso para composta comercial. La germinación de berros fue satisfactoria con la composta obtenida con concentraciones de 1:2 y 1:7, sin mostrar signos de toxicidad. Las plántulas de aguacate plantadas en sustratos que contenían 67% de composta GR:PW mostraron mayor crecimiento en la planta que aquellas con control de tratamiento, y sin signos de fitotoxicidad. Esto abre una gran oportunidad para darles un tratamiento sustentable a los residuos del mismo proceso.

Por otra parte, en el Departamento de Investigación en Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas en la Universidad Autónoma de Coahuila se pusieron en marcha programas tipo bioprocesos y biorrefinerías para el aprovechamiento de residuos de la producción de guacamole y posibilitar tratamientos con tecnologías emergentes para obtener productos atractivos a industrias como la cosmética, alimentaria, farmacéutica e incluso es viable la producción de bicom bustibles. La finalidad de este estudio es desarrollar biotecnologías que permitan valorizar la biodiversidad alimentaria regional y residuos de los cultivos de alta relevancia para América Latina. Para México se eligieron aguacate y piña como los productos agrícolas para los que se buscarían

desarrollo de infraestructura y de procesos para conversión de biomasa vegetal en la producción de biocombustibles.

Sobre el aguacate se pudieron identificar los compuestos antioxidantes polifenólicos en la cáscara y también se reconoció que la semilla, cerca del 60% es almidón en base seca e incluso es posible extraer aceites de esta. A través de la biorrefinería, estos residuos pueden generar los insumos necesarios en la generación de biocombustibles debido a los altos niveles de azúcares fermentables para producción de bioetanol.

Los resultados del estudio de generación de composta a través de los desechos orgánicos de la producción de guacamole resultan bastante atractivos, ya que podría utilizarse como fertilizante en los mismos cultivos, sin embargo, el tiempo de retención no resulta viable. De lo anterior, resulta importante profundizar en la investigación de los residuos de guacamole mediante el tratamiento por digestión anaerobia, dado el carácter pastoso de estos residuos.

Por su parte, Giraldo y Montoya (2015), han propuesto una alternativa de la producción de biocombustibles a partir de la transformación de residuos lignocelulósicos, entre los cuales se encuentran biomásas maderables y no maderables. Las investigadoras trabajaron con los residuos de banano, producidos en Colombia, realizando una caracterización de los residuos de la planta del banano mediante análisis termogravimétrico, para definir el contenido de los tres principales componentes: hemicelulosa, celulosa y lignina. Los valores encontrados, avalan que tanto el pseudotallo como la hoja de banano son residuos potenciales de aprovechamiento en el proceso de combustión con fines de generación de energía (Giraldo *et al.*, 2015).

De la misma manera, Manals *et al.*, (2011), presentaron los resultados del análisis termogravimétrico y térmico diferencial que se practicó a cuatro tipos de biomásas vegetales, en donde se pudieron apreciar tres zonas principales en el aumento de la temperatura donde hubo pérdida de masa: una a temperatura menor de 200 °C; donde hay evaporación de humedad y liberación de CO y CO₂, después se observó una etapa de mayor pérdida de masa, entre 200 y 400 °C, en la cual la celulosa y hemicelulosa se descomponen; y una tercera etapa de menos pérdida

con una temperatura por encima de los 580 °C, donde se da lugar a la descomposición de la lignina.

4. JUSTIFICACIÓN

México es bien conocido por la aportación diaria de aguacate al mundo, somos el productor número 1 de dicho fruto. El Estado de Michoacán aporta el 85.9% de la producción de aguacate en el país, con lo cual, nuestro país aporta el 45.95% de la producción mundial de aguacate. Japón ha aumentado su demanda, convirtiéndose en el segundo país con mayor demanda del fruto después de Estados Unidos quien compra el 76.8% de la exportación mexicana. (SAGARPA, 2018).

De acuerdo al boletín mensual de producción emitido por parte de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, para el ciclo perenne de septiembre del 2018 a septiembre del 2019, en México se produjeron 1 millón 637 mil 734 toneladas, de las cuales, Michoacán aportó el 78.2%, equivalente a 1 millón 280 mil 735 toneladas, seguido por el Estado de México con 94 mil 863 toneladas y Jalisco con una producción total de 94 mil 021 toneladas. (Boletín mensual de producción de Aguacate, 2019). En el mismo mes el total de área cosechada pasó de 199 mil 285 hectáreas en 2018 a 208 mil 347 en el 2019; mismas en las que Michoacán registra el mayor incremento con 7 mil 480 hectáreas; favoreciendo al incremento de la producción, donde Michoacán vuelve a ocupar el primer puesto, con un incremento de 58 mil 783 ton, equivalente al 4.8%.

El exportar frutos conlleva un gran número de especificaciones, por ejemplo, que el fruto vaya limpio, esté ordenado por tamaño y apariencia, y algunas otras especificaciones contratadas. Si el fruto no cumple con todos los requisitos de contratación se envía para el consumo del mercado interno (Morales, 2017), y en la mayoría de los casos ya no se permite ser vendido, generando muchas pérdidas económicas como de producto. Es por eso por lo que ahora México en muchos de los casos ya no sólo exporta el aguacate como fruto, sino que también lo exporta ya procesado como guacamole.

México exporta 170 000 toneladas de guacamole al año, siendo exportado a Estados Unidos, Europa, Oriente Medio y Asia, se estima que, por cada millón de

toneladas cosechadas, aproximadamente el 45% son cáscaras y semillas que finalmente terminan como basura (Hernández A. , 2018).

Los estudios relacionados al tema de tratamiento en los desechos orgánicos tanto del aguacate como de la producción de guacamole son muy escasos, es por lo que es necesario encontrar formas de aprovechar todos estos productos de desecho y desarrollar un tratamiento con diversas tecnologías para obtener productos que sean interesantes para la industria y principalmente para sacar un provecho económico de estos residuos que se generan día a día en gran cantidad.

5. HIPOTESIS

La valorización de los residuos de aguacate requiere conocer su biodegradabilidad; por lo tanto, el análisis termogravimétrico permite encontrar la cantidad de energía expresada en calor y así determinar los rangos donde se lleva a cabo la degradación de los residuos de aguacate.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Identificar los rangos de temperatura en los que existe una mayor degradación térmica para los residuos de aguacate.

6.2 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar una caracterización fisicoquímica y bromatológica de los residuos de aguacate.
- ✓ Cuantificar la cantidad de hemicelulosa, celulosa y lignina en los residuos de aguacate.
- ✓ Caracterizar las muestras a través de un análisis termogravimétrico que nos permita identificar las rampas de calentamiento.
- ✓ Caracterizar las muestras mediante un análisis de espectroscopía infrarroja para identificar los grupos funcionales del residuo de aguacate.
- ✓ Caracterizar las muestras por medio de un análisis de difracción de rayos X para determinar las propiedades texturales del residuo de aguacate.

7. METODOLOGÍA

Para poder realizar la presente investigación se siguió el orden que se muestra en la Figura 11.

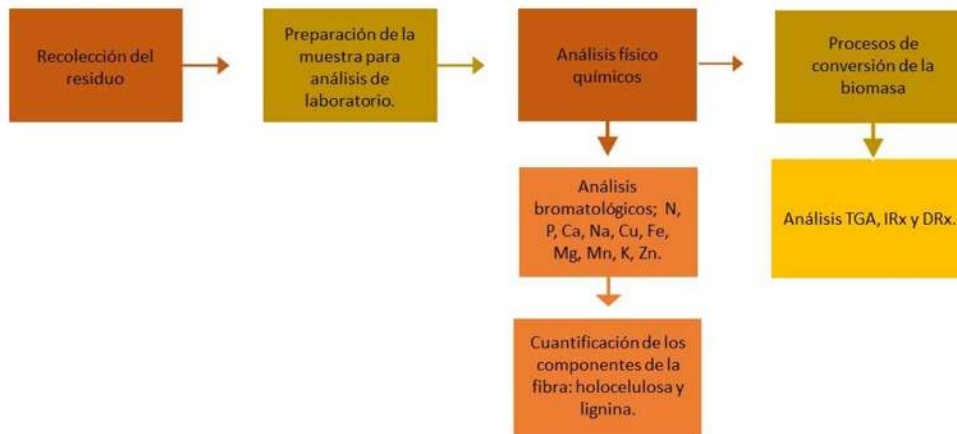


Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Elaboración propia.

7.1 Recolección de las muestras de residuo

El trabajo de investigación se está realizando con muestras del residuo de la producción de guacamole en la “Congeladora y Empacadora Nacional, Simplot”, localizada sobre Calzada La Huerta #714, en Morelia, Michoacán. En las Figuras 12 y 13, se observa la recolección del residuo de aguacate directamente de la banda de residuos de la congeladora.

El aguacate que utiliza esta congeladora es: *Persea Americana*, tipo Hass.

Estos residuos fueron trasladados al laboratorio, y 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 los procesos de conversión de la biomasa. En la Figura 14 se muestra el momento en el que se realizó el pesaje y etiquetado de las bolsas.



Figura 12. Recolección de muestra en banda mecánica de residuos.



Figura 13. Almacenamiento del residuo recolectado.



Figura 14. Peso de residuos.

7.2 Preparación de la muestra para análisis de laboratorio

Una vez que se tuvo el residuo en el laboratorio, se realizó manualmente la selección y cuantificación de los residuos. Después se molieron por separado en un molino estrella para granos, modelo 11539 Rojo, marca TISAMATIC.

7.3 Análisis físicoquímicos

Los análisis físicoquímicos de las muestras se efectuaron por triplicado.

Determinación del Contenido de Humedad

Se efectuó de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-016-1984, 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.

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:

$$C = (G1 * 100)/G$$

Ecuación 2

Donde:

C: Cenizas en %.

G: Peso de la muestra en g.

G1: Peso de cenizas en g.

Determinación de Sólidos Volátiles (SV)

Los SV se pudieron determinar de acuerdo a 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 gracias a la siguiente ecuación:

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

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).

Determinación de Lignina

La determinación de lignina en las muestras de los residuos se efectuó de acuerdo al 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).

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

Ecuación 4

Donde:

%Lig: Porcentaje de lignina base seca.

M: Muestra de residuo desengrasado y seco.

Pr: Peso del filtro con residuo.

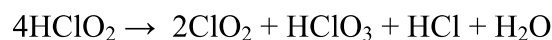
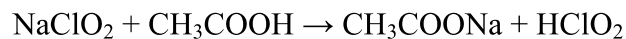
Pf: Peso del filtro.

Pc: Peso del crisol.

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

Determinación de Holocelulosa

La determinación de celulosa en las muestras, se realizó según 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 siguiente ecuación.



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.

P₁: Peso de la muestra libre de extraíbles y seca.

P₂: Peso de la muestra separada, lavada con H₂O caliente.

P₃: Peso de la muestra seca durante tres días en horno.

%HHol₁: Porcentaje de humedad de la muestra diferida libre de extraíbles.

%HHol₂: Porcentaje de humedad del solido obtenido en el filtro gooch.

7.4 Procesos de conversión de la biomasa.

A continuación, en el Cuadro 5 se describe la metodología e información de los equipos utilizados para la caracterización para los procesos de conversión de la biomasa. Estos análisis se realizaron en la Universidad Autónoma Metropolitana.

Se realizó la caracterización para los tres tipos de muestra: cáscara, semilla y mezcla.

Cuadro 4. Técnicas de caracterización para los procesos de conversión de biomasa. Fuente: Elaboración propia.

Técnica de caracterización	Equipos
<i>TGA</i>	Analizador termogravimétrico TA TGA Q500 (TA Instruments, USA).
<i>FT – IR</i>	Espectrómetro Bruker Tensor-27.
<i>DRX</i>	Microscopio electrónico de barrido. Difractómetro Philips X'PERT PRO.

- ✓ Análisis termogravimétrico (ATG), equipo de TA TGA Q500 (TA Instruments, USA), en una atmósfera controlada de N₂ y una rampa de calentamiento de 5°C/min. Finalmente, el análisis se realizará considerando el intervalo de temperatura ambiente hasta 800° C.

- ✓ Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) mediante un espectrómetro Bruker Tensor-27 con un intervalo espectral de 4000-650 cm^{-1} a temperatura ambiente.
- ✓ Difracción de rayos X (DRX) en un difractor Philips X'PERT PRO, usando las muestras en polvo en un intervalo de 4 a 80.

7.5 Análisis estadístico de los datos.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos, se ordenaron en una base de datos y se procesaron mediante estadística descriptiva.

8. RESULTADOS

8.1 Recolección de las muestras del residuo

Se recopilaron siete bolsas en total, con residuos mezclados, tal y como iban saliendo de la banda mecánica de desperdicios, lo que nos dio un total de 47.4 kg de residuo recolectado; en el Cuadro 4 se muestra el peso por cada bolsa.

Cuadro 5. Pesos de las bosas recolectadas de residuo.

Bolsa 1	6.09 kg
Bolsa 2	8.50 kg
Bolsa 3	7.35 kg
Bolsa 4	6.92 kg
Bolsa 5	7.91 kg
Bolsa 6	4.11 kg
Bolsa 7	6.52 kg

Fuente: Elaboración propia.

8.2 Preparación de la muestra para análisis de laboratorio

Los residuos fueron caracterizados en los siguientes subproductos: mezcla, cáscara y semilla. Cada uno se llevó a cabo por triplicado.

En la Figura 15 se observan los residuos molidos: de izquierda a derecha, en la primera bandeja se encuentra la mezcla: cáscara y semilla, en la bandeja de en medio la cáscara y en la última bandeja, la semilla molida.



Figura 15. Muestra molida para análisis fisicoquímicos.

8.3 Análisis fisicoquímicos

En el Cuadro 6 se muestran los parámetros químicos analizados en las muestras de residuos de la producción de guacamole: humedad, cenizas, sólidos volátiles y sólidos totales.

Cuadro 6. Parámetros químicos de los residuos (%).

MUESTRA	H %	C %	SV %	ST %
Cáscara	74.38 ± 0.56	10.81 ± 3.38	89.19 ± 3.38	25.62 ± 0.56
Semilla	55.07 ± 0.27	13.67 ± 1.60	86.33 ± 1.60	44.93 ± 0.27
Mezcla	61.67 ± 2.98	12.79 ± 2.10	87.21 ± 2.10	38.33 ± 2.98

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 7 se encuentra lo obtenido a través de los análisis fisicoquímicos; en donde se determinó en porcentaje (%) y en partes por millón (ppm), los siguientes parámetros.

Cuadro 7. Parámetros fisicoquímicos de los residuos de guacamole.

Materia seca %	29.58 ± 1.74
Nitrógeno total %	0.92 ± 0.01
Proteína bruta %	5.75 ± 0.08
Grasa total %	3.78 ± 3.70
Fibra bruta %	51.65 ± 3.62
Cenizas totales %	3.36 ± 0.44
Fósforo %	0.04 ± 0.02
Calcio %	0.15 ± 0.14
Magnesio %	0.045 ± 0.02
Potasio %	0.53 ± 0.08
Sodio %	0.01 ± 0.01

Hierro ppm	53.03 ± 16.39
Manganeso ppm	2.75 ± 1.45
Zinc ppm	13.37 ± 0.65
Cobre ppm	5.35 ± 2.58

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de la biodegradabilidad del residuo se realizaron análisis para el cálculo de los parámetros de celulosa, hemicelulosa, lignina y extractos. De estos parámetros se obtuvieron porcentajes del residuo de aguacate por separado: cáscara, semilla y mezcla. En el cuadro 8, podemos apreciar en porcentaje las cantidades de las determinaciones.

Cuadro 8. Determinaciones de parámetros lignocelulósicos.

Muestra	Celulosa %	Hemicelulosa %	Lignina %	Extractos %
<i>Cáscara</i>	30.5	22	13	16.5
<i>Semilla</i>	21.4	26.8	15	16.8
<i>Mezcla</i>	31	22.5	18	21

Fuente: Elaboración propia.

8.4 Análisis del proceso de conversión de la biomasa

Por otra parte, se han realizado análisis termogravimétricos con el fin de determinar los rangos de temperatura en los que se degrada la mayor cantidad de materia orgánica, así como las rampas de calentamiento, la cantidad de energía para degradar la biomasa y la etapa isoterma a altas temperaturas.

En la Figura 20, 21 y 22 se presentan los termogramas para los tres tipos de muestra.

TGA

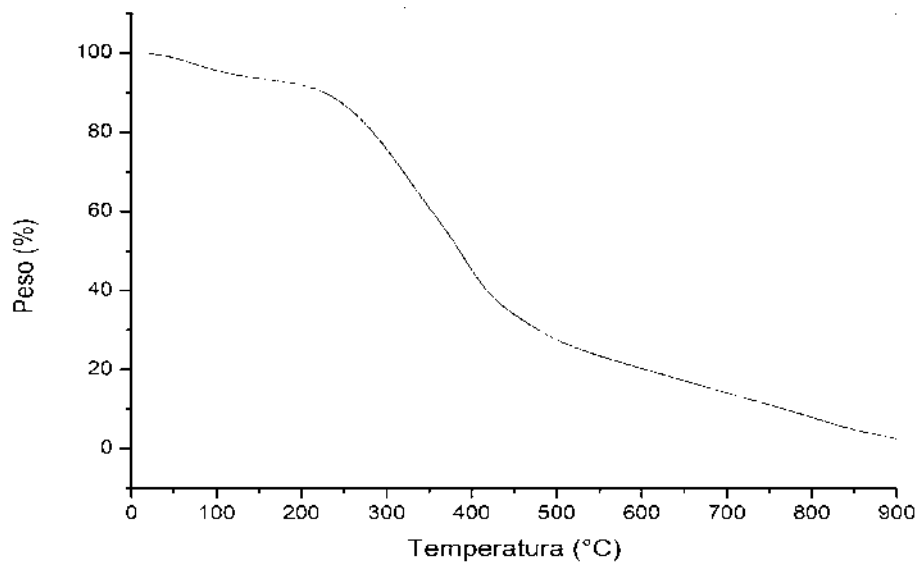


Figura 16. Curvas de TGA a la degradación térmica de la cáscara de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Analizador termogravimétrico TA TGA Q500 (TA Instruments, USA).

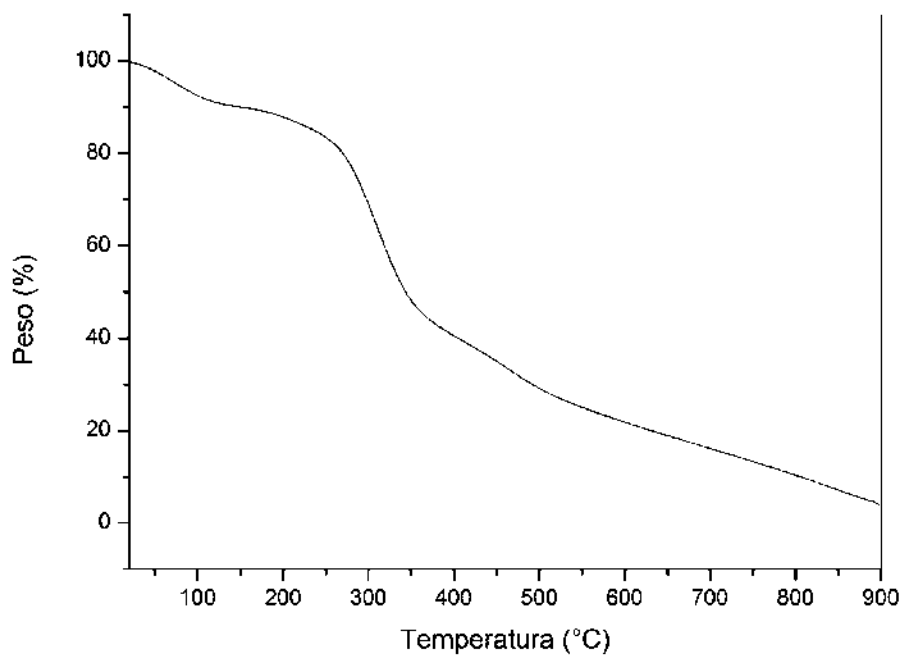


Figura 17. Curvas TGA a la degradación térmica de la semilla de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Analizador termogravimétrico TA TGA Q500 (TA Instruments, USA).

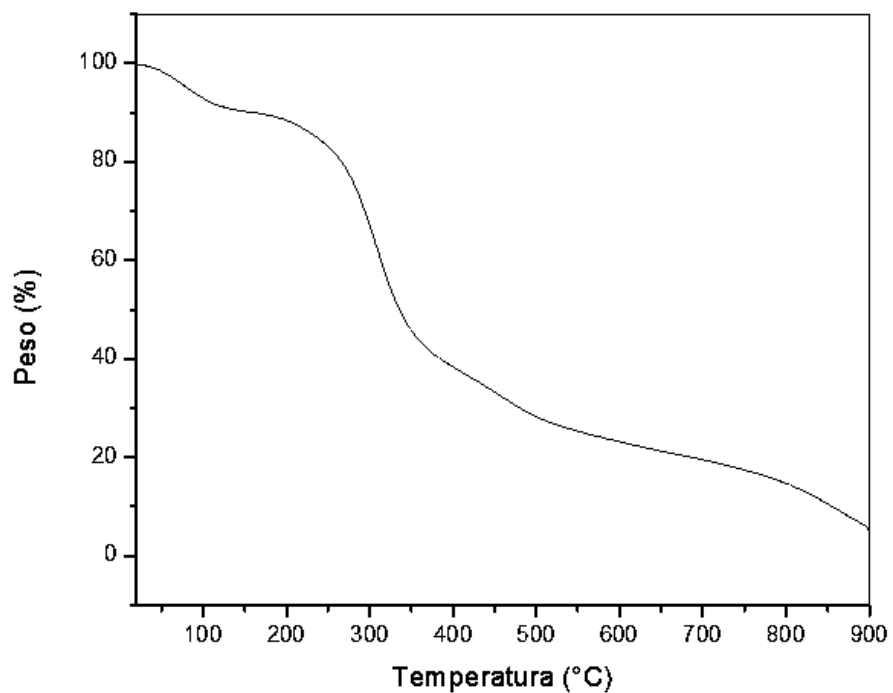


Figura 18. Curvas TGA a la degradación térmica de la mezcla del residuo de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Analizador termogravimétrico TA TGA Q500 (TA Instruments, USA).

La espectroscopia infrarroja tiene diversas aplicaciones, así como la identificación, cuantificación de compuestos químicos, detección de cambios a nivel molecular y contrastar la autenticidad de un producto (Castorena *et al.*, 2011). En las Figuras 23, 24 y 25 se presentan las espectroscopías vibracionales de los tres tipos de muestra.

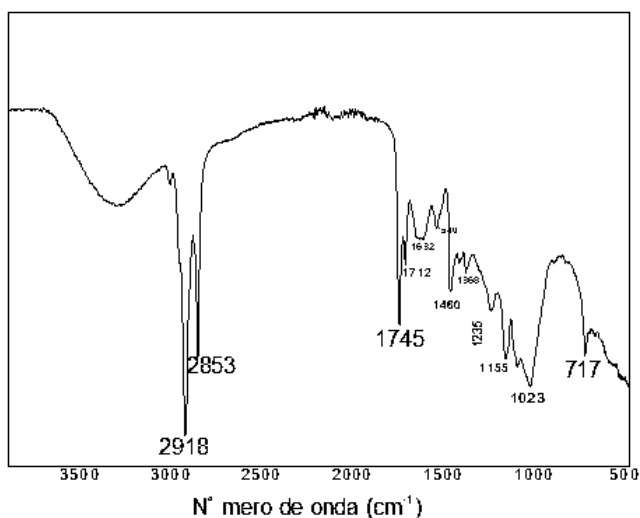


Figura 19. Análisis de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier para la cáscara del aguacate.
Fuente: Elaboración propia a partir de Espectrómetro Bruker Tensor-27.

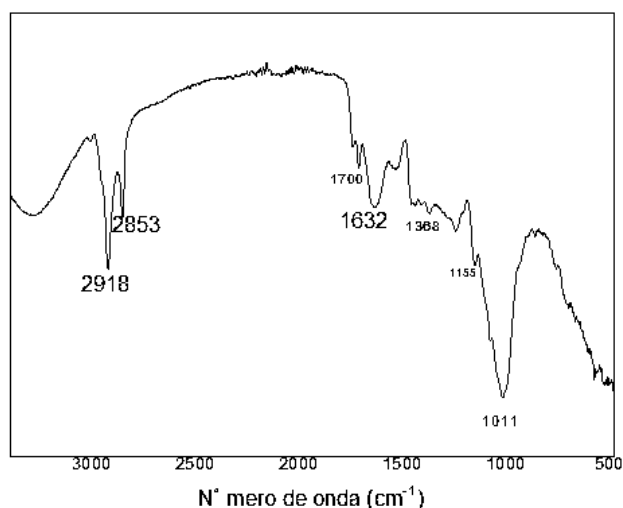


Figura 20. Análisis de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier para la semilla del aguacate.
Fuente: Elaboración propia a partir de Espectrómetro Bruker Tensor-27.

- Mezcla

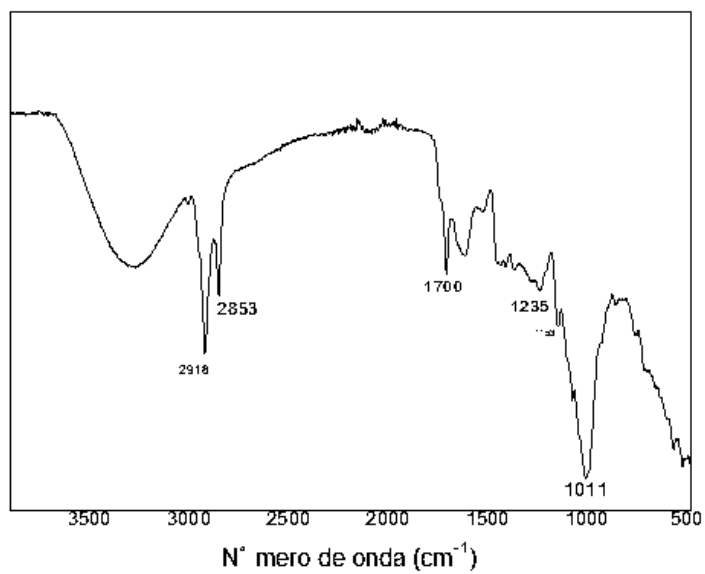


Figura 21. Análisis de espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier para la mezcla de los residuos de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Espectrómetro Bruker Tensor-27.

DRX

Por la Difracción de Rayos X pudimos identificar los elementos que están presentes en las muestras, así como sus fases cristalinas. En éstas identificamos cualitativamente la composición mineralógica de una muestra cristalina (Berman, 2011). En las Figuras 26, 27 y 28 se presentan los difractogramas de los tres tipos de muestra.

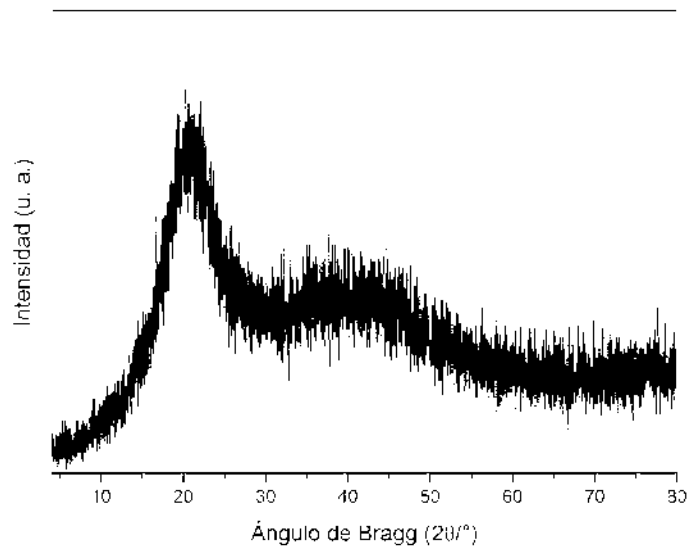


Figura 22. Análisis de difracción de rayos X para la cáscara del aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO.

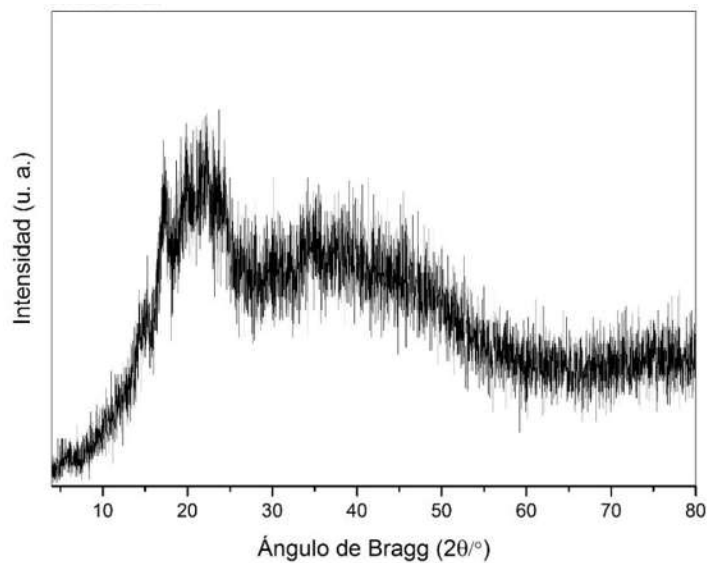


Figura 23. Análisis de difracción de rayos X para la semilla del aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO.

- Mezcla

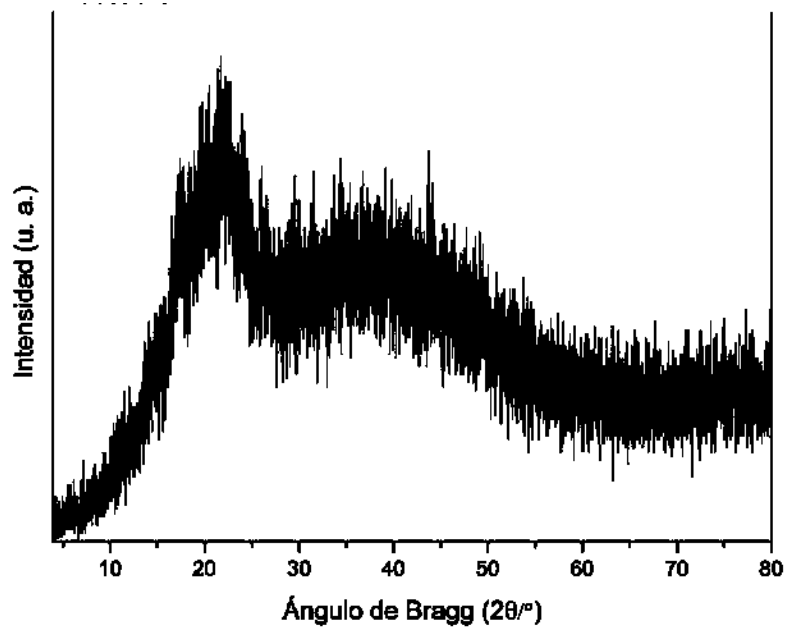


Figura 24. Análisis de difracción de rayos X para la mezcla del residuo de aguacate. Fuente: Elaboración propia a partir de Difractómetro Phillips X'PERT PRO.

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo a Reinhart, se requiere de un contenido de humedad de entre 65-70% en la matriz de residuos para que se pueda acelerar la degradación anaeróbica de los mismos. El rango de humedad encontrado en los residuos fue de 74.38% para la cáscara, 55.07% para la semilla y 61.67% para la mezcla, quedando dentro del rango para poder acelerar una degradación anaerobia y similar al que presenta Saavedra (2017), con 72.15% para la cáscara y 52.68 para la semilla.

Para las cenizas, encontramos 10.81%, 13.67% y 12.79% para la cáscara, semilla y mezcla, respectivamente, lo cual indica que la biodegradabilidad del residuo es muy alta.

Encontramos un porcentaje alto de materia orgánica, con 89.19% en la cáscara, 86.33% en la semilla y 87.21% en la mezcla.

Analizando nuestros resultados de los análisis bromatológicos en comparativa con los obtenidos por Ceballos (2013), considerando que nosotros hicimos el análisis a partir de la mezcla del residuo (cáscara y semilla) y ellos lo hicieron de manera independiente para la cáscara y la semilla, se observan varias similitudes.

En el Cuadro 9, se muestran los resultados de los análisis bromatológicos para cuatro variedades de aguacate: *Booth8*, *Trinidad* y *Papelillo*, analizados por Ceballos *et al.* y el *Hass*, analizado en este trabajo. Estos autores desarrollaron los análisis para fruto con madurez fisiológica y madurez de consumo, debido a que nuestro residuo es para la producción del guacamole, el aguacate inicia el proceso en una fase de madurez fisiológica, y sólo consideramos esos datos. Aunque en el trabajo de Ceballos *et al.* se muestra que las concentraciones de calcio, magnesio y potasio disminuyen durante el proceso de madurez, aquí sólo consideramos la similitud de los elementos. Para la concentración de Ca, Mg y K; Ceballos *et al.* reporta un rango de 0.01-0.45%, 0.03-0.05% y 0.57-1.03%, mientras que nosotros obtuvimos 0.15%, 0.045% y 0.53% respectivamente, quedando dentro de los rangos reportados por estos autores (Ceballos *et al.*, 2013). De la misma manera, para los elementos menores como hierro, manganeso, zinc y cobre no muestran

cambios significativos con la maduración, ya que estas concentraciones se ven afectadas por reacciones metabólicas que suceden a nivel celular, así como las prácticas agronómicas de los cultivos, y de igual manera, encontramos similitudes en las concentraciones de estos elementos menores. Para Fe, Zn, Mn y Cu, Ceballos *et al.* reporta un rango de 31.39-69.82 ppm, 0.05-4.67 ppm, 11.75-20.28 ppm, 2.78-8.43 ppm, mientras que nosotros obtuvimos, 53.03 ppm, 2.75 ppm, 13.37 ppm 5.35 ppm, respectivamente, encontrando que nuestros datos quedan dentro de los rangos reportados por (Ceballos *et al.*,2013).

Cuadro 9. Cuadro comparativo del análisis bromatológico de los residuos de las variedades de aguacate (base seca).

Componente	Análisis Bromatológicos						
	Booth8*		Trinidad*		Papelillo*		Hass
	Cáscara	Semilla	Cáscara	Semilla	Cáscara	Semilla	Mezcla (Cáscara y semilla)
Materia seca %	29.21	24.92	26.64	34.75	13.32	26.12	29.58
Nitrógeno total %	0.93	0.67	0.93	0.78	1.48	1.02	0.92
Proteína bruta %	5.81	4.18	5.81	4.88	9.25	6.63	5.75
Grasa total %	4.24	4.33	10.14	3.28	8.67	3.28	3.78
Fibra bruta %	53.4	2.96	57.13	8.03	17.21	3.45	51.65
Cenizas totales %	3.69	3.62	3.86	2.32	9.93	3.24	3.36
Fósforo %	0.06	0.09	0.06	0.08	0.08	0.03	0.04
Calcio %	0.03	0.45	0.01	0.2	0.04	0.16	0.15
Magnesio %	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05	0.045
Potasio %	0.46	1.03	0.59	0.91	1.16	0.57	0.53
Sodio %	0	0.03	0.01	0.02	0	0.01	0.01
Hierro ppm	67.8	48.76	65.3	69.82	50.3	31.39	53.03
Manganeso ppm	3.13	4.67	0.33	2.17	0.05	2.21	2.75
Zinc ppm	13.68	19.35	12.38	15.21	20.28	11.75	13.37
Cobre ppm	2.78	8.43	4.88	6.96	6.78	5.26	5.35

Fuente: Elaboración propia, (*) datos tomados de (Ceballos *et al.*, 2013).

En las frutas, generalmente se encuentran cantidades bajas de proteína, el aguacate es de los frutos con mayor concentración de proteína, esto presenta una condición importante para su uso como mejorador de suelos y fuente de alimentación pecuaria, aunque sería necesario verificar niveles de toxicidad en la semilla de aguacate (Ceballos *et al.*, 2013). Comparando los porcentajes de cenizas totales, materia seca y minerales, no existen variaciones importantes entre los

resultados obtenidos y lo encontrado en bibliografía. En el caso de los minerales, éstos son sintetizados a través de la planta durante el crecimiento del fruto.

En cuestión de fibra bruta, encontramos mayor similitud entre la concentración del aguacate tipo Hass del 51.65% con la concentración de fibra en la cáscara del tipo Booth8, con 53.4%. La lignina, la celulosa y la hemicelulosa son los componentes de la fibra bruta que corresponde a la fibra insoluble, no palpable, no digerible (Silva, 1994). Estos componentes, principalmente la celulosa, le confieren una estructura bastante rígida y estable, estas características permiten que los materiales con altos contenidos de celulosa, tengan un alto valor comercial, ya que pueden ser utilizados como materias primas en procesos de fermentación para la producción de diversos productos de uso industrial, como azúcares fermentables para la producción de etanol (Ángelo, 2004). Los componentes de la fibra: celulosa (CEL) y hemicelulosa (HEMICEL), se encuentran en un rango de 22 a 30.5%, 21.4 a 26.8% en cáscara y semilla respectivamente, siendo mayores a los registrados por Ceballos *et al.*, de 8 a 50% y de 1 a 5%.

Los análisis termogravimétricos permitieron determinar la temperatura en la que se degrada los diferentes componentes de la biomasa en función del tiempo. En las Figuras 20, 21 y 22, podemos observar los termogramas de las diferentes muestras del residuo de aguacate.

Para la cáscara podemos observar que tenemos una mayor pérdida de materia orgánica entre los 200 y 450°C, para la semilla, la mayor pérdida se da en un rango de temperatura de 200 y 350°C y para la mezcla del residuo se da una pérdida mayor de los 200 a 500°C y de los 500 a los 750°C. En los tres termogramas se observa que cerca de los 750°C se tiene una pérdida alrededor del 90% del total del peso del residuo. Con esto podemos determinar la cantidad de calor necesario para degradar los diferentes componentes del residuo de aguacate.

Para los análisis de espectroscopía infrarroja, (Castorena *et al.*, 2011) registraron para la pulpa de aguacate varias bandas de absorción centradas en 1653 cm⁻¹, asignada a la vibración de tipo extensiva C=O (carbonilo), 1547 cm⁻¹ y 1237 cm⁻¹.

En las Figuras 23, 24 y 25 se muestran los espectros ATR-FTIR de la cáscara, semilla y mezcla de los residuos de aguacate; en el Cuadro 10 se muestran las frecuencias y asignaciones correspondientes al espectro ATR-FTIR.

Para la cáscara encontramos longitudes centradas desde 1023 cm^{-1} hasta 2918 cm^{-1} , para la semilla y la mezcla encontramos longitudes de 1011 cm^{-1} hasta 2918 cm^{-1} , las tres con bandas de C-O, C-H y sus grupos funcionales como los Anhídridos y Alcanos, respectivamente. A continuación se muestra el cuadro de los grupos funcionales, bandas y deformación o vibración, que se atribuye de acuerdo a su longitud (cm^{-1}).

Cuadro 10. Cuadro de identificación de frecuencias y asignaciones correspondientes al espectro FTIR en residuos de aguacate.

Frecuencia FTIR (cm^{-1})	Grupo Funcional	Banda	Tipo (d=deformación y t=vibración)
1640-1500	Aminas	N-H	d
1300-900	Anhídridos	C-O	t
1750-1735	Ésteres	C=O	t
1680-1630	Amida	C=O	t
1260-1230	Ésteres	C-C(O)-C	t (acetatos)
2950-2800	Alcanos	C-H	t
3200-3650	Agua en muestra		

Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por Espectrómetro Bruker Tensor-27.

En las Figuras 26, 27 y 28 observamos como resultado, una forma amorfa para los tres casos, característico de un material orgánico. Con estos difractogramas podemos asegurar que las muestras no están contaminadas con contaminantes orgánicos e inorgánicos en los residuos de aguacate.

10. CONCLUSIONES

Con el análisis termogravimétrico se determinó la cantidad de rampas de calentamiento necesarias para iniciar la degradación de la biomasa.

Para la muestra de la cáscara y la semilla, se observó una sola rampa o rango de temperatura para la degradación de los diferentes componentes del residuo de aguacate y para la mezcla se identificaron dos rampas de calentamiento. Para las tres muestras la temperatura inicial de degradación coincide en 200°C y varía en 100°C entre la cáscara y la semilla; y de 50°C para la primera rampa y de 300°C para la segunda rampa, entre la cáscara y la mezcla. Para las tres muestras del residuo de aguacate a 750°C se identificó la degradación alrededor del 90% del total del residuo.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos de las tres muestras de los residuos de aguacate muestran estar dentro del rango de humedad óptima para acelerar la degradación anaerobia.

Los valores de celulosa y hemicelulosa encontrados en la cáscara, semilla y mezcla, pueden llegar a utilizarse como complementos de materias primas para procesos biotecnológicos, en específico, la cáscara del aguacate puede ser evaluada, como fuente de glucosa para diversas aplicaciones industriales, aunque es necesario trabajos que evalúen la toxicidad de los mismos. Para la composición bromatológica del aguacate Hass, percibimos un alto valor nutricional, debido a los contenidos de proteína, fibra y minerales, que puede ser importante para estudios enfocados en los suplementos de dieta animal o como algún recuperador de suelos.

Se pudo observar la curva de la descomposición térmica de los residuos, aplicando el análisis termogravimétrico, permitiéndonos indentificar las tres etapas importantes durante esta degradación del residuo de aguacate, la primera, por debajo de los 200°C, donde se evapora el agua y se liberan los gases de CO, CO₂ y extraíbles. Entre 200 y 450°C, se da la mayor degradación del residuo, ya que se descompone la celulosa y la hemicelulosa y por último, la zona por encima de los 500°C, donde existe una pérdida menor de biomasa y se descompone térmicamente la lignina.

Los principales componentes de la cáscara, semilla y mezcla identificados por medio de la espectroscopía infrarroja, fueron los grupos funcionales de anhídridos y alcanos.

El análisis de difracción de rayos X, no detectó elementos inorgánicos en las diferentes muestras, lo cual sugiere que los residuos de aguacate son óptimos para valorizarlos como un mejorador de suelos, alimento pecuario o biocombustibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta Lorenzo, Y., & Obaya Abreu, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX(1), 35-48.
- Acuña, M., & Murphy, G. (2007). Uso de la espectroscopía infrarroja y análisis multivariado para predecir la densidad de la madera de pino oregón. *Bosque*, 187-197.
- Ângelo, A. S. (2004). *Enzimas hidrolíticas. En: Fungos: Uma Introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia*. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul.
- Barrero, A. (2020). 2019, el año en el que el mundo instaló más energías renovables que nunca. *Energías Renovables*, 6-7.
- Berman Delgado, J. B., Lois Correa, J. A., & Romero Treviño, E. M. (2011). Caracterización de alimento a base de melaza de caña para engorda de ganado. *23° Encuentro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica del Golfo de México*, (págs. 19-23). Altamira.
- Carrier, M., Loppinet-Serani, Denux, D., Lasnier, J., Ham-Pichavant, F., Cansell, F., & Aymonier, C. (2011). Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. *Biomass & Energy*, 298-307.
- Castorena García, J. H., Rojas López, M., Delgado Macuil, R., & Robles de la Torre, R. R. (2011). Análisis de Pulpa y Aceite de Aguacate con Espectroscopia Infrarroja. *Conciencia Tecnológica*(42).
- Ceballos P., A. M., & Montoya B., S. (2013). Evaluación Química de la Fibra en Semilla, Pulpa y Cáscara de Tres Variedades de Aguacate. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 103-112.
- Colín Urieta, S., García Calderón, M. A., López Albarrán, P., & Rutiaga Quiñonez, J. G. (2011). Análisis preliminar de la composición química de la madera de cordiaeleonoides. *IV Simposio Internacional sobre técnicas agroforestales*, (pág. 223). La Habana, Cuba.

- DOF. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*.
- Elbeshbishy, E., & Nakhla, G. (2012). Batch anaerobic co-digestion of proteins and carbohydrates. *Bioresource Technology*, 170-178.
- Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADID). (2020). *Estadísticas a propósito del día mundial de la población, datos nacionales*. Ciudad de México: INEGI. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/Poblacion2020_Nal.pdf
- Escalante Hernández, H., Orduz Prado, J., Zapata Lesmes, H. J., Cardona Ruiz, M., & Duarte Ortega, M. (2010). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. Bogotá: División de Publicaciones.
- Fernández, J. (2012). *Energía de la Biomasa. Energías Renovables para el Desarrollo*. Haya Comunicación.
- Giraldo Cano, N. I., & Montoya Martínez, N. (Junio de 2015). *Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hojas) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido*. Obtenido de Universidad de Medellín: <https://core.ac.uk/download/pdf/51196282.pdf>
- González Fernández, J., Zesay, G., Álvarez, J., Hormaza, I., & López, R. (2015). Evaluation of composition and performance of composts derived from guacamole production residues. *Journal Environment Management*, 132-139.
- González Fernández, J. J., Álvarez, J. M., Hormaza, J. J., & López, R. (2014). Sustratos basados en compost de residuos de la producción de guacamole. *Actas de Horticultura*, 33-37.
- Guillen Watson, R., & Rivas Solano, O. (2012). Producción de metano a partir de desechos orgánicos generados en el tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 73-79.

- Hassan, A., & Nelson, K. (2012). Anaerobic fermentation of dairy food wastewater. *Journal Dairy Science*, 6188-6203.
- Hernández, A. (15 de Marzo de 2018). Residuos de aguacate podrían convertirse en biocombustible gracias a científicos mexicanos. *El Dictamen*.
- Hernández, M., & Delgadillo, L. (2011). Aplicación del modelo ADMI en la digestión anaerobia de aguas residuales y desechos sólidos. *Tumbaga*, 29-42.
- Manals Cutiño, E., Penedo Medina, M., & Giralt Ortega, G. (2011). Thermogravimetric and thermal analysis differential different vegetable biomasses. *Tecnología Química*, 180-190.
- Méndez Wong, A., Aguilar Garcés, E. A., & Villareal Cavazos, J. A. (2020). El Consumo Sostenible: Descripción Teórica e Histórica. *III Congreso Virtual Internacional sobre Economía Social y Desarrollo Local Sostenible*, (págs. 343-352). Coahuila.
- Míguez Tabarés, J. L. (2009). *Procesos Termoquímicos para la obtención de energía a partir de la Fitomasa Residual (combustión, gasificación, pirólisis)*. Universidad de Vigo-Escuela de Ingeniería Industrial.
- Miltner, M., Makaruk, A., & Friedl, A. (2006). CFD-Modelling for the combustion of solid baled biomass. *Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*, (págs. 1-6).
- Miranda, K. (24 de Junio de 2019). Lista de productos que exporta México. *Debate*.
- Morales, R. (02 de Enero de 2017). México exporta 170000 toneladas de guacamole al año. *El Economista*.
- Parra Huertas, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *P+L, online*, 142-159.
- Reinhart, D. R., McCreanor, P. T., & Townsend, T. G. (2002). The Bioreactor Landfill: Its Status and Future. *Waste Management and Research*, 20, 172-186.
- Rincón Martínez, J. M., & Silva Lora, E. E. (2014). *Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad*. Bogotá, Colombia: CYTED.

- Rodríguez, E., & Villegas, E. (2012). *Caracterización de polímeros aplicando el método termogravimétrico*. (Vol. 2).
- Ruíz, J. A. (2013). *Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa*. La Rioja, España: Tesis doctoral, Universidad de la Rioja.
- Rural, S. d. (2019). *Boletín mensual de producción de Aguacate*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
- Saavedra, J., Córdova, A., Navarro, R., Díaz Calderón, P., Fuentealba, C., Astudillo Castro, C., . . . Galvez, L. (2017). Industrial avocado waste: Functional compounds preservation by convective drying process. *Journal of Food Engineering*, 198, 81-90.
- SAGARPA. (31 de Enero de 2018). *Se consolida México como el primer productor de aguacate a nivel mundial con casi dos millones de toneladas en 2017*. Obtenido de Boletín SAGARPA: <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/bajacaliforniasur/boletines/Paginas/2018BS031.aspx#>
- Saldarriaga, J. F. (2012). *Caracterización de biocombustibles lignocelulósicos mediante análisis termogravimétricos*. Universidad del País Vasco, Facultad de Ciencia y Tecnología. Bilbao: Tesis master.
- Schink, B. (2008). *Principles of Anaerobic Degradation of Organic Compounds Biotechnology*. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- SECOFI (Secretaría de Economía y Fomento Industrial). (1984). *Norma Mexicana NMX-AA-018-1984*. Protección al ambiente-contaminación de suelos-residuos sólidos municipales-determinación de cenizas.
- SECOFI (Secretaría de Economía y Fomento Industrial). (1984). *Norma Mexicana NMX-AA-016-1984*. Protección al ambiente-contaminación de suelos-residuos sólidos municipales-determinación de humedad.
- SEMARNAT. (9 de junio de 2004). *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. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/nom-083.pdf>

SEMARNAT. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2015. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clase, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde.* Ciudad de México.

SEMARNAT. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde.* . México: Compendio de Estadísticas Ambientales.

SEMARNAT. (10 de enero de 2017). *Gobierno de México.* Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-de-manejo-especial-rme>

SEMARNAT. (2019). *Visión Nacional hacia una Gestión Sustentable: Cero Residuos.* Ciudad de México: Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas.

SEMARNAT. (2019). *Visión Nacional hacia una Gestión Sustentable: Cero Residuos.* Ciudad de México: Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas.

Senovilla Arranz, L. (2005). *Revalorización Energética de los Residuos de la Industria Vitivinícola.* Proyectos fin de carrera de la ETSII. Dpto. Ingeniería Química.

Shen, D., Gu, S., Luo, K., Bridgwater, A., & Fang, M. (2009). Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 1024-1030.

Silva, C. (1994). Composición y evolución de los componentes químicos de la palta (*Persea americana* Mill) durante su maduración. *Revista de la Sociedad Chilena de Tecnología de Alimentos*, 1-14.

Standard Methods. (1989). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water.* New York: American Public Health Association.

- Toledo, M. R. (2008). *Proceso de Licuefacción de Metano: Análisis de Ingeniería Básica*. D.F.: Universidad Iberoamericana: Diseño e Ingeniería de Procesos.
- Varnero Moreno, M. (2011). *Manual del Biogás*. Santiago de Chile: MIENERGÍA.
- Wark, K., & Richards, D. (2001). *Termodinámica* (6a Edición ed.). Mc Graw-Hill.
- White, J., Catallo, W., & Legendre, B. (2011). Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1-33.
- Wise, L. E., Murphy, M. D., & Á dieco, A. (1946). Chlorite holocelluloses, its fractionation and beat in go summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Paper Trade Journal* 122, 35-45.