

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Pirólisis de residuos de aguacate para la obtención de combustibles sólido y líquido

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por
Rodrigo Dighero Valenzuela para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería
Química

Guatemala

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Pirólisis de residuos de aguacate para la obtención de combustibles sólido y líquido

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por
Rodrigo Dighero Valenzuela para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería
Química

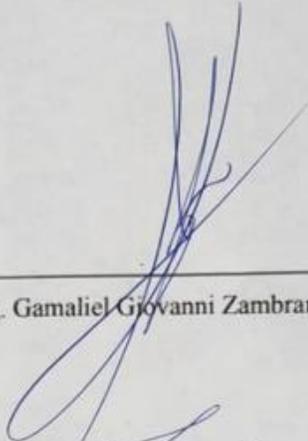
Guatemala

2023

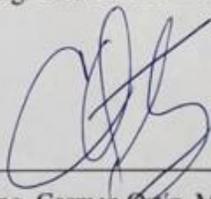
Vo. Bo.:

(f) 
Ing. Luis Ernesto Núñez González, M. Sc.

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano, M. Sc

(f) 
Ing. Luis Ernesto Núñez González, M.BA & M. Sc.

(f) 
Ing. Carmen Ortiz, M.A.

Fecha de aprobación:

6 de enero del 2023

PREFACIO

Este trabajo de graduación tuvo la finalidad de realizar una propuesta del proceso para la valorización de aguacate del país para aportar una solución de la disposición de los mismos. Quisiera agradecer en primer lugar a Dios, por darme esta oportunidad de desarrollo tanto personal como profesional y por la oportunidad de estar donde estoy y realizar un trabajo de este tipo.

Quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo que me dieron durante el proceso de desarrollo de este trabajo. A mis padres, por apoyarme incondicionalmente desde el primer semestre de la carrera hasta el último y a quienes agradezco por los valores y la educación que me han dado. A mis hermanos, por motivarme a desempeñar y ser cada día mejor persona, así como su apoyo durante la realización de este trabajo. Quiero agradecer a todos mis amigos, por todo su apoyo, consejos, ayuda y por acompañarme a lo largo de la carrera viviendo experiencias inolvidables.

Quiero agradecer a la Universidad del Valle de Guatemala, mi casa de estudios que me ha permitido vivir momentos inolvidables y que me ha permitido desarrollarme personal y profesionalmente. Quiero agradecer en especial al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala, a todos los catedráticos que me ayudaron en mi formación profesional a quienes agradezco plenamente el conocimiento que he adquirido; y en especial a mi director de carrera, el Ing. Gamaliel Zambrano, por todo su apoyo, motivación y consejos que me permitieron realizar el presente trabajo y motivarme cada vez más en convertirme en ingeniero químico. A mi asesor, el Ing. Luis Núñez, por todo su apoyo en el desarrollo del trabajo, brindándome consejos y motivación para la realización del mismo. Al Lic. Carlo Martínez, por sus consejos y motivación no solo en el desarrollo del presente trabajo, sino que también a lo largo de mi carrera.

Finalmente, quiero agradecer a la Lic. Ana Luisa Mendizábal, por todo su apoyo durante los análisis de laboratorio y a la Ing. Ingrid Yurrita, por su apoyo y consejos que me permitieron desarrollar y completar el presente trabajo.

ÍNDICE

LISTADO DE CUADROS	vii
LISTADO DE FIGURAS	xii
LISTADO DE CÁLCULOS	xiv
LISTADO DE ECUACIONES	xvi
LISTADO DE ILUSTRACIONES	xix
RESUMEN.....	xx
I.INTRODUCCIÓN.....	1
II.JUSTIFICACIÓN.....	3
III.OBJETIVOS	6
A. OBJETIVO GENERAL.....	6
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
IV.MARCO TEÓRICO.....	7
A. AGUACATE.....	7
B. BIOCOMBUSTIBLES.....	10
C. SECADO.....	12
D. REDUCCIÓN DE TAMAÑO.....	13
E. PIRÓLISIS.....	15
F. CINÉTICA DE REACTORES.....	22
G. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS.....	24
V.ANTECEDENTES.....	30
A. SITUACIÓN ACTUAL DE LAS PLANTACIONES DE AGUACATE Y APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL.....	30
B. PROCESO ACTUAL Y AVANCES DEL PROCESO DE PIRÓLISIS.....	31
C. PIRÓLISIS DE AGUACATE.....	32
D. APLICACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS.....	32
VI.METODOLOGÍA.....	34
A. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	34
B. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	34
C. SECADO DE LA MATERIA PRIMA.....	38
D. REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE LA MATERIA PRIMA.....	41
E. PIRÓLISIS EN REACTOR DE 100 G A ESCALA LABORATORIO.....	44
F. PIRÓLISIS SEMICONTINUO EN REACTOR DE 7.6 KG A ESCALA LABORATORIO.....	48

G.	ANÁLISIS CINÉTICO DE LOS REACTORES DE PIRÓLISIS.....	52
H.	ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS.....	56
VII.RESULTADOS		66
VIII.DISCUSIÓN DE RESULTADOS		74
IX.CONCLUSIONES		95
X.RECOMENDACIONES		97
XI.BIBLIOGRAFÍA		99
XII.ANEXOS		104
A.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA.....	104
B.	DATOS ORIGINALES.....	106
C.	DATOS CALCULADOS.....	143
D.	ECUACIONES.....	187
E.	CÁLCULOS DE MUESTRA.....	200
F.	ANÁLISIS DE ERROR.....	211
XIII.ILUSTRACIONES.....		215
XIV.GLOSARIO		232

LISTADO DE CUADROS

Cuadro No. 1 Caracterización de los residuos de aguacate.....	66
Cuadro No. 2 Comparación de tipos y tiempos de secado de la materia prima.....	66
Cuadro No. 3 Eficacia de los equipos de molienda utilizados para la molienda de la materia prima.....	67
Cuadro No. 4 Rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g en base húmeda para una alimentación de 50:50 (Cáscara:Semilla) y una alimentación en proporción aleatoria.....	68
Cuadro No. 5 Rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g para una alimentación de 50:50 (Cáscara:Semilla) y una alimentación en proporción aleatoria.....	69
Cuadro No. 6 Rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 7.6 kg para una alimentación en proporción aleatoria.....	69
Cuadro No. 7 Rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 7.6 kg para una alimentación aleatoria.....	70
Cuadro No. 8 Análisis fisicoquímicos del producto sólido de pirólisis.....	72
Cuadro No. 9 Análisis fisicoquímicos del producto líquido de pirólisis.....	72
Cuadro No. 10 Mediciones de bulto aireadas de la materia prima previo a la molienda.....	106
Cuadro No. 11 Mediciones de densidades de bulto compactas de la materia prima.....	106
Cuadro No. 12 Longitud de materia prima.....	107
Cuadro No. 13 Masa individual de partícula.....	107
Cuadro No. 14 Humedad de la cáscara de aguacate previo al proceso de secado.....	108
Cuadro No. 15 Humedad de la semilla de aguacate previo al proceso de secado.....	108
Cuadro No. 16 Humedad de la cáscara de aguacate posterior al secado solar.....	108
Cuadro No. 17 Humedad de la semilla de aguacate posterior al secado solar.....	109
Cuadro No. 18 Humedad de la cáscara de aguacate en el secado solar.....	110
Cuadro No. 19 Humedad de la cáscara de aguacate en el secado con horno deshidratador.....	111
Cuadro No. 20 Humedad de la semilla de aguacate en el secado con horno deshidratador.....	112
Cuadro No. 21 Reducción de tamaño en molino de discos y la trituradora de cuchillas.....	112
Cuadro No. 22 Datos de análisis granulométrico del molino de discos.....	113
Cuadro No. 23 Datos de análisis granulométrico de la trituradora de cuchillas.....	113
Cuadro No. 24 Humedad de material molido.....	114
Cuadro No. 25 Datos de densidad de bulto aireada del material molido.....	114
Cuadro No. 26 Datos de densidad de bulto compacta del material molido.....	115

Cuadro No. 27 Masas del proceso de pirólisis en el reactor de 100 g en proporción 50:50 (cáscara:semilla).....	115
Cuadro No. 28 Masas del proceso de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación en proporción aleatoria.....	116
Cuadro No. 29 Masas del proceso incompleto de pirólisis en el reactor de 7.6 kg con alimentación en proporción aleatoria.....	116
Cuadro No. 30 Masas del proceso completo de pirólisis en el reactor de 7.6 kg con alimentación en proporción aleatoria.....	116
Cuadro No. 31 Datos para el análisis cinético en el reactor de 100 g.....	117
Cuadro No. 32 Datos para el análisis cinético en el reactor de 7.6 kg.....	119
Cuadro No. 33 Análisis de cromatografía de gases-masas de la fracción ligera del producto líquido de pirólisis.....	122
Cuadro No. 34 Análisis de cromatografía de gases-masas de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis.....	126
Cuadro No. 35 Datos de poder calorífico en base húmeda del producto sólido de pirólisis.....	132
Cuadro No. 36 Datos de poder calorífico en base húmeda del producto líquido de pirólisis.....	132
Cuadro No. 37 Masas de crisoles llevados a peso constante para los análisis de humedad, cenizas y material volátil del producto sólido de pirólisis.....	133
Cuadro No. 38 Masas para el análisis de humedad del producto sólido de pirólisis.....	134
Cuadro No. 39 Masas para el análisis de cenizas del producto sólido de pirólisis.....	135
Cuadro No. 40 Masas para el análisis de material volátil del producto sólido de pirólisis.....	136
Cuadro No. 41 Mediciones de densidad de bulto aireada del producto sólido de pirólisis.....	137
Cuadro No. 42 Mediciones de densidad de bulto compacta del producto sólido de pirólisis.....	137
Cuadro No. 43 Mediciones de densidad del producto líquido de pirólisis.....	137
Cuadro No. 44 Mediciones de viscosidad del producto líquido de pirólisis.....	138
Cuadro No. 45 Mediciones del análisis de Kjeldahl del producto sólido de pirólisis.....	138
Cuadro No. 46 Densidad de bulto aireada y análisis estadístico de la materia prima.....	143
Cuadro No. 47 Densidad de bulto compacta y análisis estadístico de la materia prima.....	144
Cuadro No. 48 Densidad de bulto de trabajo y análisis estadístico de la materia prima.....	145
Cuadro No. 49 Diámetro de partícula de la cáscara y la semilla de aguacate y su análisis estadístico.....	146
Cuadro No. 50 Análisis estadístico para la masa de la cáscara y semilla de aguacate.....	146

Cuadro No. 51 Análisis estadístico de la humedad en la cáscara y semilla de aguacate previo al proceso de secado.....	147
Cuadro No. 52 Análisis estadístico de la humedad de la cáscara y semilla de aguacate posterior al proceso de secado solar.....	147
Cuadro No. 53 Porcentaje de humedad en el proceso de secado en el secado solar.....	148
Cuadro No. 54 Porcentaje de humedad en el proceso de secado en el secado en horno deshidratador.....	149
Cuadro No. 55 Análisis estadístico de la humedad de la cáscara y semilla de aguacate posterior al proceso de secado en horno deshidratador.....	150
Cuadro No. 56 Eficacias de los equipos de reducción de tamaño utilizados para la materia prima.....	150
Cuadro No. 57 Cálculos de análisis granulométrico del molino de discos.....	151
Cuadro No. 58 Cálculos de análisis granulométrico de la trituradora de cuchillas.....	152
Cuadro No. 59 Análisis estadístico de la humedad del material molido.....	153
Cuadro No. 60 Densidad de bulto aireada y análisis estadístico del material molido.....	154
Cuadro no. 61 densidad de bulto compacta y análisis estadístico del material molido.....	154
Cuadro No. 62 Densidad de bulto de trabajo y análisis estadístico del material molido.....	155
Cuadro No. 63 Balance de masa de la pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla).....	156
Cuadro No. 64 Rendimiento de los productos de pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla).....	156
Cuadro No. 65 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla).....	157
Cuadro No. 66 Rendimiento de los productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla).....	157
Cuadro No. 67 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla).....	158
Cuadro No. 68 Balance de masa de la pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación aleatoria.....	158
Cuadro No. 69 Rendimiento de los productos de los productos de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria.....	159
Cuadro No. 70 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria.....	159

Cuadro No. 71 Rendimiento de los productos de los productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria.....	160
Cuadro No. 72 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria.....	160
Cuadro No. 73 Balance de masa de la pirólisis en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria	161
Cuadro No. 74 Rendimiento de los productos de pirólisis en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria.	161
Cuadro No. 75 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria para el proceso completo	162
Cuadro No. 76 Rendimiento de los productos de pirólisis en base seca en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria	162
Cuadro No. 77 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria para el proceso completo.....	163
Cuadro No. 78 Cálculo de cambio de masa en el reactor y de formación de producto gaseoso en el análisis cinético del reactor de 100 g.	163
Cuadro No. 79 Cálculo de cambio de masa en el reactor y de formación de producto gaseoso en el análisis cinético del reactor de 7.6 kg.	166
Cuadro No. 80 Constantes de la ecuación de temperatura en función del tiempo para los dos reactores	174
Cuadro No. 81 Constantes de la ecuación de masa en función del tiempo para los dos reactores.....	175
Cuadro No. 82 Abundancia de los compuestos de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis sin solvente para la muestra 1.....	175
Cuadro No. 83 Abundancia de los compuestos de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis sin solvente para la muestra 2.....	177
Cuadro No. 84 Análisis estadístico del poder calorífico en base húmeda del producto sólido de pirólisis.....	177
Cuadro No. 85 Cálculo del poder calorífico del producto líquido en base húmeda de pirólisis para la fracción ligera y pesada.....	178
Cuadro No. 86 Análisis estadístico del poder calorífico en base húmeda del producto líquido de pirólisis para la fracción ligera y pesada	179

Cuadro No. 87 Porcentaje de humedad y análisis estadístico de las muestras del producto sólido de pirólisis	179
Cuadro No. 88 Porcentaje de cenizas y análisis estadístico de las muestras del producto sólido de pirólisis	180
Cuadro No. 89 Porcentaje de material volátil y análisis estadístico de las muestras de producto sólido de pirólisis	181
Cuadro No. 90 Porcentaje de carbono fijo y análisis estadístico de las muestras de producto sólido de pirólisis	182
Cuadro No. 91 Densidad de bulto aireada y análisis estadístico del producto sólido de pirólisis	182
Cuadro No. 92 Densidad de bulto compacta y análisis estadístico del producto sólido de pirólisis	183
Cuadro No. 93 Densidad de bulto de trabajo y análisis estadístico del producto sólido de pirólisis	184
Cuadro No. 94 Densidad y análisis estadístico del producto líquido de pirólisis	184
Cuadro No. 95 Análisis estadístico de la viscosidad dinámica del producto líquido de pirólisis	185
Cuadro No. 96 Viscosidad cinemática del producto líquido de pirólisis	186
Cuadro No. 97 Porcentaje de nitrógeno y análisis estadístico para el análisis de Kjeldahl del producto sólido de pirólisis	187

LISTADO DE FIGURAS

Figura No. 1 Desacople del uso de recursos e impactos ambientales con el PIB y el crecimiento poblacional en función del tiempo	3
Figura No. 2 Composición de los residuos y desechos sólidos comunes en Guatemala en 2014....	4
Figura No. 3 Composición química del aguacate	9
Figura No. 4 Análisis elemental de residuos de aguacate y de otras biomásas.....	9
Figura No. 5 Diagrama general del proceso de pirólisis de biomasa	17
Figura No. 6 Balance de masa y energía de la pirólisis de tallos de algodón	17
Figura No. 7 Rendimientos de los productos de pirólisis dependiendo del tipo de proceso	19
Figura No. 8 Esquema de reacción de la pirólisis de biomasa	20
Figura No. 9 Análisis granulométrico del molino de discos	67
Figura No. 10 Análisis granulométrico del trituradora de cuchillas	68
Figura No. 11 Predicción de la masa en función del tiempo para el reactor de 100 g	70
Figura No. 12 Predicción de la masa en función del tiempo para el reactor de 7.6 kg.	71
Figura No. 13 Balance de masa y energía del reactor de 100 g	73
Figura No. 14 Balance de masa y energía del reactor de 7.6 kg	73
Figura No. 15 Balance de masa del reactor de pirólisis de 100 g.	104
Figura No. 16 Balance de energía del reactor de pirólisis de 100 g.....	104
Figura No. 17 Balance de masa del reactor de pirólisis de 7.6 kg.	105
Figura No. 18 Balance de energía del reactor de pirólisis de 7.6 kg.....	105
Figura No. 19 Cromatograma de la primera muestra de la fracción ligera del producto líquido de pirólisis.....	123
Figura No. 20 Cromatograma de la segunda muestra de la fracción ligera del producto líquido de pirólisis.....	124
Figura No. 21 Cromatograma de la tercera muestra de la fracción ligera del producto líquido de pirólisis.....	125
Figura No. 22 Cromatograma de la primera muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis.....	128
Figura No. 23 Cromatograma de la segunda muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis.....	129
Figura No. 24 Cromatograma de la primera muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis, espectro ampliado.....	130

Figura No. 25 Cromatograma de la segunda muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis, espectro ampliado.....	131
Figura No. 26 Espectro IR de la cáscara y semilla de aguacate molida.....	140
Figura No. 27 Espectro IR de producto sólido de pirólisis en una corrida incompleta y completa.....	141
Figura No. 28 Espectro IR sobrepuesto de materia prima, pirólisis incompleta y pirólisis completa.....	142
Figura No. 29 Gráfico de análisis granulométrico para el molino de discos	151
Figura No. 30 Gráfico de análisis granulométrico para la trituradora de cuchillas.....	153
Figura No. 31 Predicción de la masa dentro del reactor de 100 g en función del tiempo.....	166
Figura No. 32 Predicción de la masa dentro del reactor de 7.6 kg en función del tiempo.....	173

LISTADO DE CÁLCULOS

Cálculo No. 1 Cálculo de densidad de bulto aireada y compacta de la materia prima ...	200
Cálculo No. 2 Cálculo de densidad de bulto de trabajo	201
Cálculo No. 3 Diámetro de partícula.....	201
Cálculo No. 4 Porcentaje de humedad en el proceso de secado por medio de un horno deshidratador.....	201
Cálculo No. 5 Eficacia de molino	202
Cálculo No. 6 Análisis granulométrico	202
Cálculo No. 7 Densidad de bulto aireada y compacta para el material molido y el producto sólido de pirólisis	202
Cálculo No. 8 Balance de masa para el proceso de pirólisis	203
Cálculo No. 9 Rendimiento de productos de pirólisis.....	203
Cálculo No. 10 Conversión de biomasa en el proceso de pirólisis	204
Cálculo No. 11 Rendimiento de productos de pirólisis en base seca	204
Cálculo No. 12 Cálculo de la masa de material sólido dentro del reactor y formación de producto gaseoso para el análisis cinético.....	204
Cálculo No. 13 Flujo de agua de enfriamiento en el condensador	205
Cálculo No. 14 Balance de masa de la combustión de propano en el hogar del reactor de 7.6 kg.....	205
Cálculo No. 15 Energía añadida al reactor de pirólisis de 100 g	206
Cálculo No. 16 Energía añadida al reactor de pirólisis de 7.6 kg	207
Cálculo No. 17 Balance de energía en el condensador	207
Cálculo No. 18 Determinación de la energía proporcionada por los productos de pirólisis.....	207
Cálculo No. 19 Cálculo teórico de la energía liberada por la materia prima	208
Cálculo No. 20 Porcentaje de abundancia sin solvente de los compuestos de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis	208
Cálculo No. 21 Poder calorífico del producto líquido de pirólisis	208
Cálculo No. 22 Porcentaje de humedad en el producto sólido.....	209
Cálculo No. 23 Porcentaje de cenizas en el producto sólido.....	209
Cálculo No. 24 Porcentaje de material volátil en el producto sólido	210
Cálculo No. 25 Porcentaje de carbono fijo en la muestra	210
Cálculo No. 26 Densidad del producto líquido	210

Cálculo No. 27 Viscosidad cinemática del producto líquido	211
Cálculo No. 28 Porcentaje de nitrógeno en el producto sólido	211
Cálculo No. 29 Cálculo de media.....	211
Cálculo No. 30 Cálculo de desviación estándar	212
Cálculo No. 31 Cálculo de intervalo de confianza al 95%	212
Cálculo No. 32 Cálculo de prueba Q.....	213
Cálculo No. 33 Cálculo de coeficiente de variación	213
Cálculo No. 34 Cálculo de incertidumbres por sumas y restas	214
Cálculo No. 35 Cálculo de incertidumbres por multiplicaciones y divisiones.....	214

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación no. 1 Ecuación de la velocidad de reacción teórica para el proceso de pirólisis	24
Ecuación No. 2 Ecuación de Boltzmann de temperatura en función del tiempo para hornos mufla.....	55
Ecuación No. 3 Ecuación de la masa en función del tiempo para el reactor de pirólisis ..	55
Ecuación No. 4 Volumen del recipiente utilizado para la medición de la densidad de bulto	187
Ecuación no. 5 densidad de bulto.....	187
Ecuación No. 6 Densidad de bulto de trabajo	187
Ecuación No. 7 Factor de compresibilidad de sólidos para la densidad de bulto de trabajo.....	188
Ecuación No. 8 Diámetro de partícula	188
Ecuación No. 9 Porcentaje de humedad en el proceso de secado por medio del horno deshidratador.....	188
Ecuación No. 10 Masa inicial de agua en la muestra.....	188
Ecuación No. 11 Masa de la materia prima seca utilizada para el secado	188
Ecuación No. 12 Masa de agua en un tiempo determinado durante el proceso de secado	188
Ecuación No. 13 Eficacia de molino	189
Ecuación No. 14 Porcentaje de material en una malla determinada	189
Ecuación No. 15 Porcentaje de material que atraviesa la malla inicial del sistema de tamizaje	189
Ecuación No. 16 Porcentaje de material que atraviesa una malla determinada	189
Ecuación No. 17 Balance de masa del proceso de pirólisis	189
Ecuación No. 18 Rendimiento de los productos de pirólisis.....	190
Ecuación No. 19 Conversión de los productos de pirólisis.....	190
Ecuación No. 20 Masa de alimentación seca en el proceso de pirólisis.....	190
Ecuación No. 21 Cambio de masa global del producto gaseoso en el proceso de pirólisis.....	190
Ecuación No. 22 Cambio de masa global del producto líquido en el proceso de pirólisis.....	191
Ecuación No. 23 Constante de relación de formación de producto gaseoso con respecto al producto líquido	191
Ecuación No. 24 Cambio de masa instantáneo del producto líquido.....	191

Ecuación No. 25 Cambio de masa instantáneo del producto gaseoso utilizando la constante de relación de productos.....	191
Ecuación No. 26 Cambio de masa instantáneo dentro del reactor	191
Ecuación No. 27 Cambio de masa instantáneo del producto gaseoso.....	191
Ecuación No. 28 Masa instantánea en el punto 2 dentro del reactor.....	192
Ecuación No. 29 Ecuación de temperatura en función del tiempo para el reactor de 100 g.....	192
Ecuación No. 30 Ecuación de temperatura en función del tiempo para el reactor de 7.6 kg.....	192
Ecuación No. 31 Ecuación de masa en función del tiempo para el reactor de 100 g.....	192
Ecuación No. 32 Ecuación de masa en función del tiempo para el reactor de 7.6 kg.....	193
Ecuación No. 33 Flujo másico de agua en el condensador	193
Ecuación No. 34 Masa de agua de enfriamiento utilizada	194
Ecuación No. 35 Porcentaje de aire en exceso en un proceso de combustión	194
Ecuación No. 36 Masa de propano que reacciona durante la combustión	194
Ecuación No. 37 Energía en forma de calor proporcionada por la mufla	194
Ecuación No. 38 Energía en forma de calor proporcionada por la combustión de gas propano.....	194
Ecuación No. 39 Calor retirado en el condensador.....	195
Ecuación No. 40 Calor transferido por la mezcla gaseosa en el condensador	195
Ecuación No. 41 Energía en forma de calor proporcionada por el producto sólido	195
Ecuación No. 42 Energía en forma de calor proporcionada por el producto líquido.....	195
Ecuación No. 43 Energía en forma de calor proporcionada por el producto gaseoso.....	196
Ecuación No. 44 Energía en forma de calor proporcionada por la materia prima	196
Ecuación No. 45 Porcentaje de abundancia de los compuestos obtenidos de cromatografía sin solvente.....	196
Ecuación No. 46 Poder calorífico del producto líquido	196
Ecuación No. 47 Porcentaje de humedad en el producto sólido	197
Ecuación No. 48 Porcentaje de cenizas en el producto sólido	197
Ecuación No. 49 Porcentaje de masa perdida en el análisis de material volátil.....	197
Ecuación No. 50 Porcentaje de material volátil en el producto sólido.....	197
Ecuación No. 51 Porcentaje de carbono fijo en el producto sólido.....	197
Ecuación No. 52 Densidad del producto líquido.....	198

Ecuación No. 53 Viscosidad cinemático del producto líquido	198
Ecuación No. 54 Porcentaje de nitrógeno en el producto sólido.....	198
Ecuación No. 55 Media muestral	198
Ecuación No. 56 Desviación estándar muestral	199
Ecuación No. 57 Intervalo de confianza al 95%	199
Ecuación No. 58 Prueba Q.....	199
Ecuación No. 59 Coeficiente de variación.....	199
Ecuación No. 60 Cálculo de incertidumbres para sumas y restas	200
Ecuación No. 61 Cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones.....	200

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración No. 1 Medición de densidades de bulto de la materia prima en recipiente plástico	215
Ilustración No. 2 Medición del diámetro de la semilla de aguacate.....	216
Ilustración No. 3 Medición del diámetro de la cáscara de aguacate	216
Ilustración No. 4 Preparación de la muestra de semilla de aguacate para la medición de porcentaje de humedad.....	217
Ilustración No. 5 Preparación de las muestras para el secado solar	217
Ilustración No. 6 Cáscaras de aguacate luego del proceso de secado solar	218
Ilustración No. 7 Trituradora de residuos orgánicos utilizada para la molienda de la materia prima	219
Ilustración No. 8 Molino de discos utilizado para la molienda de la materia prima.....	220
Ilustración No. 9 Cáscara de aguacate luego del proceso de molienda.....	220
Ilustración No. 10 Cáscara de aguacate luego del proceso de molienda.....	221
Ilustración No. 11 Sistema de tamizaje utilizado para el análisis granulométrico	222
Ilustración No. 12 Sistema de pirólisis del reactor de 100 g	223
Ilustración No. 13 Reactor de pirólisis de 100 g	223
Ilustración No. 14 Sistema de pirólisis del reactor de 7.6 kg	224
Ilustración No. 15 Medición de la masa de la materia prima para el reactor de pirólisis de 100g.....	224
Ilustración No. 16 Medición de la masa de la materia prima para el reactor de pirólisis de 7.6 kg.....	225
Ilustración No. 17 Producto sólido del proceso de pirólisis.....	226
Ilustración No. 18 Producto líquido del proceso de pirólisis	226
Ilustración No. 19 Sistema de crisoles utilizados para el análisis proximal del producto sólido	227
Ilustración No. 20 Crisol con muestra utilizado para el análisis proximal.....	228
Ilustración No. 21 Crisol con cenizas obtenidas durante el análisis proximal	228
Ilustración No. 22 Sistema de digestión de Kjeldahl para el análisis del producto sólido.....	229
Ilustración No. 23 Sistema de destilación de Kjeldahl para el análisis del producto sólido	230
Ilustración No. 24 Medición de viscosidad del producto líquido.....	231

RESUMEN

El siguiente trabajo presenta los resultados y análisis realizados para la pirólisis de residuos de aguacate con la finalidad de obtener combustibles en fase sólida y líquida. El objetivo principal del trabajo es valorizar los residuos de aguacate por medio del proceso de pirólisis como una alternativa a procesos de aprovechamiento de biomasa como la producción de biogás o la combustión directa de los residuos.

Para lograr el objetivo propuesto se realizó la caracterización de la materia prima, un secado y reducción de tamaño de la materia prima, el proceso de pirólisis a dos escalas distintas y el análisis fisicoquímico de los productos. Se obtuvo de la caracterización que la humedad de la cáscara es el mayor contribuyente al proceso, la cual afecta al proceso de pirólisis al ser el primer producto que se obtiene del sistema. El proceso de secado por medio de un horno resultó más efectivo que el secado solar por el tiempo considerable que se ahorra en el proceso, más no obstante presenta la desventaja de aumentar los costos operativos dado al alto consumo energético que se requiere.

Por medio de la pirólisis convencional de residuos de aguacate, se obtuvo para proporciones de alimentación 50:50 de cáscara y semilla de aguacate que se obtienen rendimientos en base seca similares para los tres productos, con el producto sólido presentando el mayor rendimiento. Mientras que en proporción de alimentación desconocida o aleatoria se tiene para ambas escalas realizadas que el mayor rendimiento obtenido corresponde al producto líquido. Se determinó que la composición de entrada, la humedad y la transferencia de calor son las principales variables que afectan los rendimientos de los productos del proceso.

Por otra parte, se determinó que el proceso de pirólisis de aguacate no es eficiente energéticamente dado que se requiere más energía de la que se puede obtener. Se requirió de 103,847.71 kJ de energía en el reactor de 100 g para obtener 1010.54 kJ de energía a partir de los productos; y se requirió de 259,036.3 kJ en el reactor de 7.6 kg para obtener 20233.46 kJ de energía a partir de los productos.

No obstante, los análisis fisicoquímicos realizados muestran que se obtuvo los productos deseados del proceso de pirólisis. Se obtuvo un combustible sólido apto para la combustión con alto porcentaje de carbono fijo y alto poder calorífico. Se debe de realizar una deshidratación del producto líquido para llegar a obtener un valor energético mayor en los productos de pirólisis.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas crecientes de la actualidad es el aumento considerable de los residuos producidos, debido al aumento de la población y la mala disposición de los mismos en ciertas industrias, no solo a nivel nacional, sino que también a nivel mundial. En Guatemala el principal tipo de residuos domiciliarios producidos consisten primordialmente en residuos orgánicos, los cuales al descomponerse expuestos al ambiente liberan metano el cual tiene un potencial de calentamiento global mayor al del dióxido de carbono (GMI, 2011).

Guatemala se encuentra entre los mayores productores y comercializadores de aguacate no solo a nivel regional, sino que, a nivel mundial, con un 2.1% de la producción mundial. Sin embargo, del fruto se aprovecha esencialmente la pulpa y se desecha la cáscara y la semilla, los cuales tienen un porcentaje representativo en masa del fruto total. Por lo que de todos los cultivos de aguacate en el país y de las empresas que se dedican a realizar guacamol en bolsa, es de esperar que exista una alta cantidad de residuos de cáscara y semilla de aguacate (Food and Agriculture Organization (FAO), 2020).

El aprovechamiento de residuos orgánicos o biomasa ha demostrado alto potencial en las últimas décadas, ya sea para su utilización en ciertos procesos o para la producción de biocombustibles alternativos a los combustibles fósiles causantes del cambio climático a nivel mundial. La producción de biogás parece ser una solución viable, más no obstante requiere de un tiempo considerable y de una estructura y condiciones adecuadas para la producción de un producto aprovechable (Auris Retamozo & Morales De La Cruz, 2019). Por lo que el análisis de procesos alternos para la producción de biocombustibles es una alternativa para el aprovechamiento de los residuos de biomasa.

La pirólisis es un proceso de degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, donde material con composición orgánica, siendo polímeros y materia orgánica, se descompone mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión. En este proceso se obtienen productos en tres fases, siendo un producto sólido, líquido y gaseoso. El producto en fase líquida puede aprovecharse mediante procesos de combustión, ya sea en motores de combustión interna o para su utilización en ciclos de vapor para la producción de energía eléctrica. El producto gaseoso, al igual que el producto líquido, puede utilizarse para procesos de generación de energía eléctrica en ciclos de vapor y finalmente el producto sólido que puede utilizarse como combustible en instalaciones industriales (Gobierno de España, 2009).

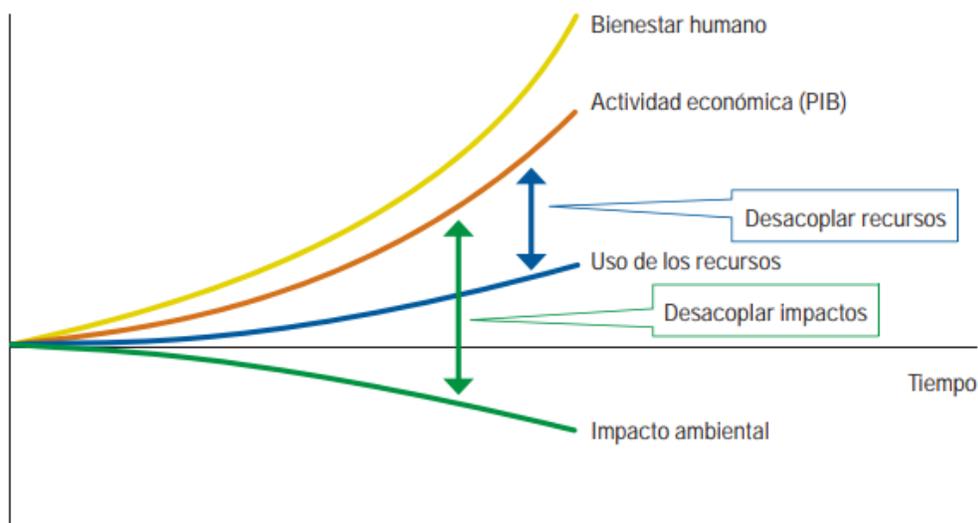
De los productos de pirólisis, dependiendo de la materia prima, será la proporción y rendimiento de cada uno, más no obstante la fracción gaseosa es generalmente la más baja. Por lo que se puede aprovechar los productos sólidos y líquidos obtenidos del proceso de pirólisis ya que múltiples estudios los mencionan como potenciales combustibles entre otras aplicaciones (Gutiérrez, 2019). Del proceso se obtiene el producto sólido o char, el cual posee un alto contenido de material orgánico y bajo contenido de humedad que permite su potencial uso como combustible (Castro, 2018); el producto líquido tiene alto potencial como combustible de igual manera, este posee una estructura compleja en el caso de cuando proviene de biomasa. No obstante, este es aprovechable debido a su alto contenido en aromáticos, parafinas, entre otros compuestos (Gutiérrez, 2019).

En este estudio de investigación se realizó el proceso de pirólisis de residuos de aguacate, principalmente de la cáscara y la semilla de aguacate para evaluar los productos sólidos y líquidos como biocombustibles. Esto conllevó a un análisis de la materia prima, del proceso de pirólisis en dos reactores distintos y los análisis fisicoquímicos de los productos.

II. JUSTIFICACIÓN

El incremento de la población mundial en las últimas décadas ha implicado el incremento en el consumo alimenticio y por ende de los residuos producidos. Lograr el desacople entre el crecimiento poblacional y el PIB con el consumo de recursos ha sido una problemática creciente en la situación mundial actual, tal como se observa en la Figura no. 1 (Fischer-Kowalski & Swilling, 2011). La materia orgánica al desecharse y estar expuesta al ambiente sigue un proceso de descomposición donde se libera metano, el cual tiene un potencial de calentamiento global mayor al dióxido de carbono, de aproximadamente 28 y 34 veces más que el dióxido de carbono (GMI, 2011).

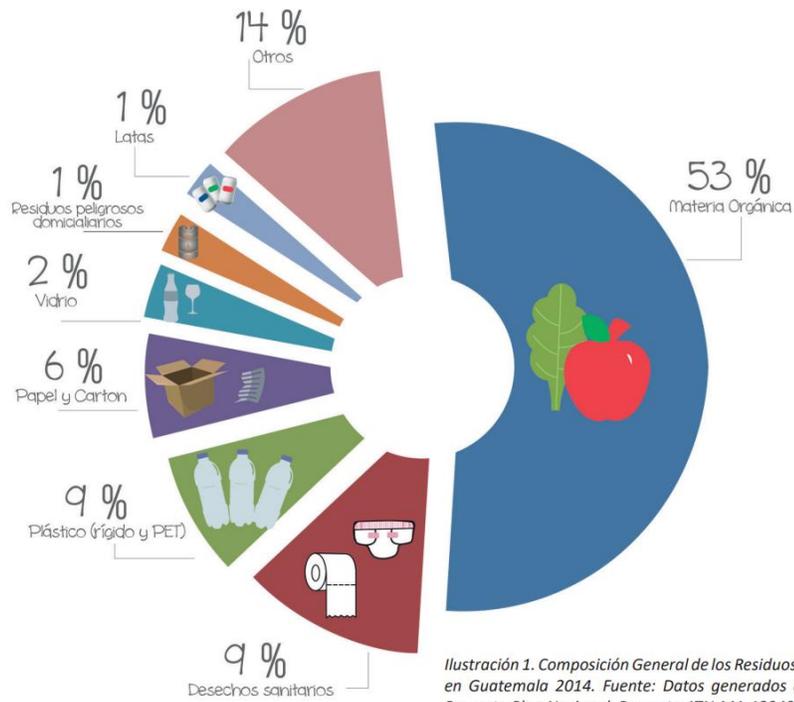
Figura No. 1 Desacople del uso de recursos e impactos ambientales con el PIB y el crecimiento poblacional en función del tiempo



(Fischer-Kowalski & Swilling, 2011)

Según el Ministerio de Ambiente y Recursos Ambientales de Guatemala, la generación per cápita de residuos y desechos sólidos comunes es de 0.519 kilogramos por habitante al día, donde la composición de los residuos sólidos en Guatemala en el 2014 se divide en materia orgánica, la cual representa un 53% de los desechos sólidos, tal como se observa en la Figura no. 2 (MARN, 2018). Si se mantienen los datos proporcionados por el MARN (generación per cápita de residuos y desechos sólidos de 0.519 kilogramos por habitante al día) y tomando como base la población del año 2020, según el INE, siendo esta 18,055,025 habitantes, se tienen 9,370,557.975 kilogramos de desechos al día, de los cuales el 53% corresponden a desechos orgánicos, por lo que se tienen 4,966,395.727 kilogramos de desechos orgánicos en un día (INE, 2020). Debido a estas altas cifras, es de interés el encontrar un manejo o uso a dichos residuos con el fin de mitigar la contaminación que estos provocan.

Figura No. 2 Composición de los residuos y desechos sólidos comunes en Guatemala en 2014



(MARN, 2018)

El aguacate se encuentra entre las cuatro mayores frutas tropicales comercializadas a nivel mundial junto al mango, la piña y la papaya. En el 2020, el aguacate representó en cuanto a exportaciones a nivel mundial 2252287 toneladas y representó en cuanto a exportaciones a nivel mundial 2337029 toneladas (Food and Agriculture Organization (FAO), 2020). Teniendo en cuenta que la cáscara y la semilla llegan a representar un porcentaje alto del fruto total, de las cantidades anteriormente mencionadas se tiene una alta cantidad de residuos producidos no solo por la cáscara y la semilla, sino que por pérdidas y mermas como los frutos podridos, por ejemplo. Según el Ministerio de Economía, Guatemala se posiciona en el décimo cuarto lugar a nivel mundial en cuanto a producción y exportación de aguacate, representando un 2.1% de la producción a nivel mundial (Ministerio de Economía de Guatemala, 2017). En Guatemala, predomina la producción de aguacate Booth-8, pero sobre todo de aguacate Hass, que se produce en los departamentos de Chimaltenango, Sacatepéquez, Alta Verapaz, Baja Verapaz, Quiché, San Marcos, Quetzaltenango, Huehuetenango, Jalapa, Retalhuleu, Escuintla y Petén (Agexport, 2022).

Los residuos generados de aguacate en Guatemala consisten primordialmente de cáscara y la semilla del aguacate, aunque entre los residuos también pueden encontrarse frutos con pulpa con cierto

grado de descomposición. En general, tanto la cáscara como la semilla representan un alto porcentaje másico del fruto, según Bressani, 2009, puede llegar a representar hasta un 40% en peso del fruto total en promedio, teniendo entre un 12% y 16% en peso para la cáscara y entre un 14% y 24% para la semilla (Bressani, Rodas, & de Ruiz, 2009). En Guatemala en el año 2020, según el INE, hubo un suministro de 131,417 toneladas métricas de aguacate, del cual 26,582 toneladas métricas representan pérdidas, mermas y desperdicios del alimento (INE, 2020). Además, en Guatemala existen empresas que realizan guacamol en bolsa, por lo que únicamente utilizan la pulpa del fruto y no se aprovechan los principales residuos, siendo la cáscara y la semilla del aguacate.

Dado que en el proceso de pirólisis se obtienen productos en las tres fases, estos se pueden aprovechar debido a las múltiples aplicaciones que poseen. Entre las aplicaciones que poseen los productos, se pueden aprovechar energéticamente como biocombustibles. Debido a la compleja estructura de los residuos de aguacate, se pueden obtener combustibles líquidos y sólidos con propiedades aptas para su uso en hornos, motores o incluso caldearas (Gutiérrez, 2019).

Debido a lo anterior mencionado, realizar un proceso de pirólisis de biomasa parece ser un proceso alternativo a la obtención de biocombustibles. Además de que en Guatemala no se cuenta con suficiente información técnica acerca del tratamiento de residuos orgánicos, específicamente de aguacate, por lo que la pirólisis parece ser una opción viable. Con lo anterior mencionado, tampoco se cuenta con suficiente información técnica o estudios de pirólisis de biomasa y específicamente de residuos de aguacate. Se pretende analizar la pirólisis de residuos de aguacate, específicamente de la cáscara y la semilla, para analizar el proceso y los productos del mismo para evaluar su potencial uso como biocombustibles y valorizar los residuos.

III. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Realizar una pirólisis de residuos de aguacate (*Persea Americana*) para la obtención de productos de valor comercial y técnico con el fin de proponer una aplicación para la valorización de los residuos.

B. Objetivos específicos

1. Caracterizar los residuos de aguacate para evaluar el proceso de secado y reducción de tamaño a realizar previo al proceso de pirólisis.
2. Realizar un proceso de secado y reducción de tamaño en base a lo obtenido de la caracterización para la obtención de material con un tamaño de partícula y humedad apto para el proceso de pirólisis.
3. Determinar el rendimiento y composición de los combustibles sólido y líquido obtenidos a partir del proceso de pirólisis a partir de los residuos de aguacate y compararlos con el de otros biocombustibles.
4. Realizar la comparación de dos escalas del proceso de pirólisis de residuos de aguacate por medio de dos reactores con distinta capacidad para determinar su efecto en los rendimientos del proceso.
5. Proponer un modelo cinético de la pirólisis de residuos de aguacate que permita la predicción de la variación de la temperatura y la masa dentro del reactor con el tiempo en cada escala estudiada.
6. Determinar las propiedades fisicoquímicas de los combustibles sólido y líquido obtenidos y compararlas con el de otros biocombustibles.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Aguacate

1. Generalidades del aguacate

El aguacate o *Persea Americana* tiene origen americano, teniendo una distribución desde México hasta Perú, pasando por Centro América y Sudamérica. Hoy en día se produce en la mayoría de los países con climas cálidos y templados, actualmente se cultiva en México, el cual es el primer productor mundial, Guatemala, Brasil, Australia, Estados Unidos, entre otros países productores. El aguacate pertenece a la familia de las Lauráceas, formada por 52 géneros y aproximadamente 3500 especies, esta familia posee una gran cantidad de especies con importancia económica y productoras de ciertos aceites esenciales como el alcanfor y maderas finas. El género *Persea* se encuentra formado por 150 especies distribuidas en regiones tanto tropicales como subtropicales y se forma en árboles de hojas coriáceas y aromáticas (Tamayo, Cordoba, & Londoño, 2008).

El aguacate suele crecer en árboles que llegan a sobrepasar los 10 metros de altura, es una planta polimórfica y posee diferentes formas como columnar, piramidal, obovado, rectangular, circular, semicircular, semielíptico, irregular, entre otras formas. En cuanto al fruto, el aguacate, se trata de una baya que varía en su forma dependiendo de la raza, algunas de las formas que puede tomar el fruto son oblata, esferoide, esferoide alto, elipsoide, obovado-angosto, obovado, claviforme, romboide, periforme, ovoide o globoso. La cáscara del fruto conforme madura puede tomar colores que van desde el verde, verde claro, verde oscuro, amarillo, anaranjado claro, rojo, púrpura y negro y la pulpa puede tomar colores como marfil, amarillo, amarillo claro, amarillo intenso, verde claro, verde entre otros, en ambos casos esto depende de la raza (Tamayo, Cordoba, & Londoño, 2008).

Para la corteza o la cáscara del aguacate, esta puede ser lisa, papilada, es decir, con prominencias, finamente ahuecada, muy ahuecada, lustrosa, opaca, estriada, lobulada, rugosa o abollada. En cuanto a la semilla del aguacate, esta puede ser grande y puede tomar distintas formas dependiendo de la raza como oblata, esferoide, elipsoide, ovada, ovada ancha, cordiforme, de base aplanada con ápice redondo, de base aplanada con ápice cónico entre otras formas (Tamayo, Cordoba, & Londoño, 2008).

En Guatemala, la raza guatemalteca se denomina *Persea nubigena var. Guatemalensis* la cual se adapta a condiciones subtropicales, con temperaturas que varían entre 4 a 19°C. Los árboles pueden adaptarse a alturas entre 1000 y 2000 metros sobre el nivel del mar, con frutos con formas mencionadas previamente, como esférica, ovalada, de corteza gruesa, consistencia correosa, dura, leñosa y quebradiza.

El color del fruto es desde verde opaco hasta morado oscuro y poseen un contenido de grasa del 20% para el aguacate y el tamaño de la semilla varía de pequeña a grande dependiendo de la variedad. Las variedades que se encuentran en Guatemala son la variedad Hass, Reed, Edranol, Itzamna, Linda, Nabal, Pinkerton y Mayapan (Tamayo, Cordoba, & Londoño, 2008).

2. Estructura del aguacate

El aguacate es una fruta con alto contenido de grasas totales y carbohidratos, la pulpa posee en promedio: Un porcentaje de humedad del 73.23%, una energía de 160 kcal, 2.00 g de proteína., 14.66 g de grasa total, 8.53 g de carbohidratos totales y 1.58 g de ceniza. Además, la pulpa de aguacate es fuente de calcio, fósforo, hierro, tiamina, riboflavina, niacina, vitamina C, potasio, sodio, zinc y magnesio (INCAP, 2012).

Según Bressani, 2009, la composición másica promedio de la cáscara de aguacate en base seca para las variedades Hass, Utz, Booth 8, Panchoy y Shupte presentan un porcentaje de humedad promedio del 10.09%, un porcentaje de proteína de 4.93%, un porcentaje de grasa de 5.91%, un porcentaje de cenizas de 4.19%, un porcentaje de fibra cruda de 48.30%, un porcentaje de carbohidratos de 67.98% y un porcentaje de humedad de 67.17%. Ahora la composición másica promedio para la semilla de aguacate para las mismas variedades presentan porcentajes promedio para la humedad de 8.75%, para la proteína de 4.98%, para la grasa de 5.72%, para la ceniza de 3.43%, para la fibra cruda de 3.43%, para los carbohidratos de 62.82% y humedad de 58.82% (Bressani, Rodas, & de Ruiz, 2009).

El aguacate posee estructuralmente, tanto en la pulpa como la semilla y la cáscara, una cantidad determinada de lignina, celulosa y hemicelulosa. La siguiente figura según García, 2020, presenta la composición estructural de la pulpa, la cáscara y la semilla de aguacate en términos porcentuales para la humedad, el contenido de cenizas, lípidos, contenido fenólico, hemicelulosa, celulosa y lignina.

Figura No. 3 Composición química del aguacate

Por producto	Humedad	Ceniza	Lípidos	Contenido fenólico	Extracto éter	Hem 3	Cel/glu 4	Lignina
Pulpa agotada	81.4–82.8	4.5–7.0	9.3	14.7–12.8	18.2 ¹	8.5	29.8	26.9
Cáscara	70.9–75.3	1.0–8.7	6.3–10.4	6.0–9.3	43.7 1/20.5–34.4 ²	11.5–25.3	12.1–27.6	4.4–35.3
Semilla	35.2–57.0	0.9–2.9	2.3–6.0	3.7–5.3	21.0–35.9 ²	3.0–47.9	6.5–40.9	1.8–15.8
Agua residual	88.3	17.9	53.8	10.3	ND	ND	ND	ND

(García, del Mar, & Castro, 2020)

Por otra parte, el análisis elemental del fruto muestra que la cáscara de aguacate posee un alto contenido en carbono (49.8%) y oxígeno (42.2%), mientras que el contenido de hidrógeno y nitrógeno es mucho menor. La siguiente figura según García, 2020, presenta el análisis elemental de algunos residuos de aguacate y de otros tipos de biomasa para su comparación.

Figura No. 4 Análisis elemental de residuos de aguacate y de otras biomásas

Elemento (%)	Cáscara de aguacate	Semilla de aguacate	Hueso de oliva	Carbón vegetal
C	49.8	42.1–48.0	46.6	79.3
H	5.7	5.6–5.8	6.33	2.7
N	1.0	0.5–0.7	1.81	0.7
O	42.2	43.0–50.8	45.20	17.0
S	ND	ND–0.1	0.11	0.3

(García, del Mar, & Castro, 2020)

3. Procesos de producción industriales

Los procesos industriales de aprovechamiento de aguacate para la producción de productos alimenticios como el guacamol embolsado o simplemente la comercialización del fruto inician desde la plantación de aguacate. En este punto se añaden los fertilizantes adecuados para el desarrollo del fruto, para que cumpla con la composición presentada anteriormente. Luego se da la cosecha del fruto, donde se

recolectan los frutos y pasan a una unidad de clasificación donde se separa cualquier otro material que no sean los aguacates cosechados. Una vez separados del resto de materiales no deseados, como hojas de árboles, tierra, piedras, entre otros, pasa a una unidad de lavado, donde se añade agua y fungicidas para evitar el desarrollo y proliferación de un microorganismo patógeno. Dependiendo de la aplicación que tengan los frutos serán los procesos posteriores, un ejemplo es la producción de guacamol en bolsa. En este proceso luego de lavado se realiza un proceso de pelado y descorazonado (donde se remueve la cáscara y la semilla de aguacate), produciendo los principales residuos del proceso. La pulpa de aguacate posteriormente pasa a una unidad de molienda para formar el guacamol, añadiendo condimentos dependiendo el tipo de formulación que se esté realizando. Luego de obtener el guacamol con la formulación adecuada para a una unidad de empacado de alta presión y se obtiene el producto final, siendo el aguacate en bolsa (García, del Mar, & Castro, 2020).

B. Biocombustibles

1. Biomasa y sus características

Se denomina biomasa a toda aquella materia orgánica renovable que puede ser tanto de origen animal o vegetal y que puede utilizarse como una fuente de energía. El término biomasa tiene dos acepciones distintas ya que aplica tanto al recurso, es decir, la materia prima y a la energía que produce por su utilización. En cuanto al recurso, como se mencionó previamente, tiene origen biológico, que puede ser tanto animal, vegetal o microbiano, algunos ejemplos pueden ser residuos forestales, desechos agrícolas, desechos industriales o desechos urbanos como las aguas residuales o cualquier residuo cotidiano. En cuanto al contexto energético, el término biomasa se utiliza para denominar a aquella fuente de energía renovable, la biomasa cae en la categoría de renovable siempre que la tasa de uso o consumo sea menor a su tasa de generación. Además, se denomina renovable ya que, al ser de origen biológico, su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético y acumulada en los enlaces de las moléculas orgánicas (Fernández, y otros, 2015).

La biomasa posee una composición que varía en proporción dependiendo del origen de la materia prima, ya sea si es de origen vegetal o animal y de los procesos por los cuales se generó la biomasa. Para la biomasa vegetal, está compuesta por hidratos de carbono principalmente, puede ser en forma de compuestos lignocelulósicos o amiláceos, al igual que compuestos protéicos, lípidos y compuestos orgánicos nitrogenados, estos últimos tres en menor proporción. Desde el punto de vista energético, la biomasa con una estructura sólida se utiliza más para aplicaciones termoquímica, mientras que las de estructura poco sólida tiene mayor variedad de aplicaciones. Para la biomasa animal, se utilizan sus desechos sólidos, como las heces, para la producción de biogás, donde se aprovecha el metano producido

en un biodigestor anaeróbico y a condiciones específicas para aprovechar dicha fuente de energía para numerosas aplicaciones (Castells, Biomasa y Bioenergía: Energía, Agua, Medioambiente, Territorialidad y Sostenibilidad, 2012).

Como se mencionó previamente, dependiendo del origen de la biomasa y sus características serán las aplicaciones de los mismos. Según lo anterior mencionado, se puede clasificar la biomasa como biomasa de alto grado, biomasa residual, biomasa de origen urbano y fangos. La biomasa de alto grado corresponde a la biomasa con alta homogeneidad, lo que la hace la más adecuada para usos energéticos, en esta categoría entran los cultivos energéticos, bosques y plantaciones. La biomasa residual corresponde a aquella que es químicamente homogénea y/o heterogénea, esta proviene de residuos agrícolas, forestales y de procesos industriales. En este caso puede estar compuesta por unas varias especies distintas, lo que permite determinar sus características químicas. La biomasa de origen urbano corresponde a residuos sólidos urbanos, los cuales poseen un 50% aproximado de peso húmedo de biomasa, esta es heterogénea ya que proviene de distintas fuentes y ha sido sometida a múltiples procesos. Los fangos tienen un origen heterogéneo, se obtienen principalmente de aguas residuales y tal como los residuos urbanos, tienen múltiples orígenes lo que le da el carácter heterogéneo (Castells, Biomasa y Bioenergía: Energía, Agua, Medioambiente, Territorialidad y Sostenibilidad, 2012).

2. Biocombustibles y sus clasificaciones

Al realizar ciertos procesos de transformación se obtienen biocombustibles, los cuales se utilizan para fines energéticos dependiendo de su estado físico, se tienen biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Los biocombustibles tanto gaseosos como líquidos se utilizan para el transporte y se denominan de igual manera biocarburantes. Los biocombustibles sólidos se pueden utilizar en forma de pellets, donde se el contenido de humedad es la variable de mayor interés, debido a que, a mayor contenido de humedad, menor será el poder calorífico del biocombustible. Los biocombustibles se combinan con el oxígeno en los procesos de combustión y liberan la energía que contiene en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas que los forman, donde se obtiene como producto final anhídrido carbónico y agua (Fernández, y otros, 2015).

Los biocombustibles líquidos pueden clasificarse según la International Energy Agency (IEA), como biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación. Los biocombustibles de primera generación son aquellos biocombustibles utilizados en la actualidad que ya han alcanzado la etapa de producción comercial. Estos proceden de cultivos que utilizan técnicas similares a las de cosechas agrícolas alimenticias. Los biocombustibles de segunda generación o biocombustibles lignocelulósicos

son aquellos que no compiten de ninguna forma con los suelos agrícolas, sino que se producen a partir de biomasa lignocelulósica como la contenida en la madera, por ejemplo, estos biocombustibles de segunda generación se encuentran en fase comercial. Los biocombustibles de tercera generación son aquellos aceites procedentes de algas y otros microorganismos, tal como el hidrógeno procedente de la biomasa. Estos biocombustibles aún se encuentran en fase de desarrollo y no hay procesos a escala por lo que no se pueden comercializar. Finalmente, los biocombustibles de cuarta generación son aquellos que se obtienen mediante procesos térmicos y bioquímicos, como lo es el proceso termoquímico de pirólisis para la obtención de biocombustibles líquidos a partir de biomasa (Guerrero, Marrero, Martínez, & Puch, 2010).

C. Secado

El contenido de humedad es una variable importante en los biocombustibles, ya que afecta el poder calorífico del combustible reduciéndolo, dado que parte de la energía utilizada se perdería solo en evaporar el agua contenida en la biomasa, por lo que debe de realizarse un proceso de secado. La operación de secado refiere a la eliminación de humedad contenida en alguna sustancia. El producto final siempre es el sólido, lo que diferencia el proceso de otras operaciones unitarias como la evaporación, que aunque exista una eliminación de sustancia líquida, se parte de un líquido para obtener un concentrado líquido, mientras que en el secado se obtiene un sólido con un contenido de humedad significativamente menor. El secado es una operación que suele estar presente en todas las industrias químicas, esto se debe a que se facilita la manipulación en etapas posteriores, reduce gastos de transporte y facilita la conservación, en este caso de medicamentos (Treybal, 1988).

Todas las operaciones de secado pueden clasificarse como operaciones por lotes o continuas. Por lo general esta asignación se realiza desde el punto de vista del sólido a secar. Las operaciones por lotes son procesos por semilotes, donde cierta cantidad de sustancia que se va a secar se expone a una corriente de aire que fluye continuamente, en la cual se evapora la humedad (Treybal, 1988).

Los métodos de operación para los equipos por lotes o semilotes se operan intermitente o cíclicamente en condiciones de estado no estacionario. En principio estos procesos son: se carga el equipo con el sólido o sustancia a secar, permanece en el equipo hasta secar el sólido (hasta un contenido de humedad deseado), se descarga el sólido del equipo secador y se vuelve a cargar con un nuevo lote (Treybal, 1988).

Los procesos de secado por lotes son operaciones relativamente caras (conviene más utilizar un secado continuo), lo que limita las operaciones a una escala pequeña, ya sea para plantas piloto, investigación y para secar ciertos materiales especiales o valiosos cuyo costo total no se va a ver tan alterado por el costo agregado por el proceso de secado. Algunos de los equipos de secado por lotes son los secadores de platos, los secadores de camión, los secadores por lotes de circulación transversal, los cuales entran en la categoría de secadores directos; los secadores de anaqueles al vacío, los secadores de charola con agitación, los secadores giratorios de vacío, los cuales entran en la categoría de secadores indirectos; y finalmente los secadores por congelamiento (Treybal, 1988).

Por otro lado, el secado continuo, que es la operación más utilizada en la industria debido a su relación tamaño de secador con producto. Evita tiempos muertos durante el proceso también en comparación del método por lotes esta es menos costosa. En este caso el modo en que funciona es el siguiente. El material se va transportando a través del secador mientras que una corriente móvil de aire o gas, eso dependerá del material que se esté usando, ira quitando la humedad al sólido. El flujo utilizado en este proceso puede ser paralelo o a contracorriente. En el caso de flujo a contracorriente, el gas más caliente está en contacto con el sólido más seco. El sólido descargado se calienta a una temperatura en que se acerca al gas entrante. Esta proporciona un secado más rápido. Maneja temperaturas altas. La desventaja es que al manejar altas temperaturas el material puede desintegrarse. En el caso del flujo paralelo el sólido se calentará únicamente a la temperatura de bulbo húmedo del gas los sólidos sensibles al calor pueden secarse con frecuencia mediante un gas de flujo caliente. Cuando la salida del secador de gas se ha enfriado no daña al sólido. Este tipo de flujo permite un mayor control del contenido de humedad del sólido descargado. Algunos equipos utilizados para operaciones de secado continuo son los secadores de túnel, los secadores de tipo turbo, los secadores de circulación transversal, los secadores rotatorios, los secadores rotatorios por circulación transversal, secadores de tambor, por aspersion y los lechos fluidizados (Treybal, 1988).

D. Reducción de tamaño

1. Proceso de reducción de tamaño

La reducción de tamaño es un término aplicable a todas las formas en las cuales las partículas sólidas se pueden cortar o romper en unidades con un menor tamaño de partícula. Industrialmente, la reducción de tamaño se lleva a cabo por medio de diferentes métodos y con distintos fines. La reducción de tamaño también permite aumentar la reactividad del sólido, al tener una mayor área superficial. La reducción de tamaño puede darse de diversas maneras, pero por lo general se utilizan cuatro en los equipos de reducción de tamaño, siendo la compresión, el impacto, la frotación o rozamiento y el corte.

Por lo general, la compresión se utiliza para la reducción de tamaño de partículas gruesa de sólidos duros, donde se obtiene poco material fino. El impacto genera productos gruesos, medios o finos dependiendo del sólido y el equipo utilizados. La frotación permite la reducción de tamaño de materiales blandos no abrasivos y produce productos muy finos. Finalmente, el corte permite obtener un tamaño definido de partícula y dependiendo del caso da una forma definida, con muy pocos o nada de finos (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

2. Equipos de reducción de tamaño

Los equipos utilizados para los procesos de reducción de tamaño van a depender de cómo se va a dar la reducción de tamaño, de entre los cuatro mecanismos mencionados anteriormente. Se denomina molino a los equipos de reducción de tamaño, que realizan la molienda por medio de una compresión o impacto; trituradoras, quebrantadoras o machacadoras a aquellos equipos que realizan la reducción de tamaño únicamente por medio de la compresión; molinos ultrafinos a aquellos equipos que realizan la reducción de tamaño únicamente por medio de la frotación; y cortadoras a aquellos equipos de reducción de tamaño por medio de un corte (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

Los equipos utilizados para la reducción de tamaño por compresión, en el caso de las trituradoras, se tiene las trituradoras de mandíbula, las trituradoras giratorias y las trituradoras de rodillos, los cuales se utilizan para grandes cantidades de sólidos y con tamaño de partícula elevado y forma no uniforme. Un ejemplo de uso de estos equipos de reducción de tamaño es para la reducción de tamaño de minerales, para el caso de la trituradora giratoria. En el siguiente tipo de equipos, que se utilizan para compresión e impacto, son los molinos, de los cuales se tienen el molino de martillos, el molino de rodillos y el molino de volteo o tambor. El molino de martillos es un ejemplo de los molinos que funcionan por medio de impacto, donde se tiene un rotor que gira a elevadas velocidades y se cuenta con una serie de martillos giratorios acoplados al rotor para lograr la reducción de tamaño. El molino de rodillos es un ejemplo de los molinos que funcionan por medio de compresión, donde dos rodillos metálicos se colocan a cierta distancia entre sí (lo suficientemente cerca para lograr la reducción de tamaño) y por medio de la acción de ambos molinos girando en direcciones opuestas se da la molienda. Finalmente, el molino de volteo o tambor es una combinación de la compresión con el impacto y un ejemplo son los molinos de bolas, los cuales son cilindros con diámetro elevado lleno de bolas de acero que permiten realizar la reducción de tamaño de las partículas sólidas (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

El siguiente tipo de equipos utilizados para la reducción de tamaño son los molinos ultrafinos, de los cuales se encuentran el molino de rodillos, el molino de discos, el molino de chorro y los molinos de

volteo. Un ejemplo es el molino de discos, el cual posee discos planos rotatorios de caras estrilladas o lisas, donde se logra obtener una reducción de tamaño con una cantidad moderada a alta de finos dependiendo de la distancia entre las dos caras del molino. Finalmente, entre los equipos que caen en la categoría de cortadoras, se tienen las cortadoras de cuchillas. Dependiendo de la aplicación, será el tamaño y forma de las cuchillas y dependiendo del proceso y el material sólido será la cantidad de material fino obtenido (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

3. Análisis granulométrico

Luego de realizar un proceso de reducción de tamaño, se busca determinar no solo la eficiencia de la molienda, sino que también la cantidad de material sólido producido para un tamaño de partícula determinado. Para ello se realizan análisis granulométricos utilizando tamices para lograr una distribución del material molido a través de los mismos. Las mallas utilizadas siguen estándares de diseño de los cuales los más utilizados son las mallas Tyler y las mallas mesh, estas últimas el número indica el número de hilos existentes en una pulgada lineal, por lo que, entre mayor sea el número de mesh, más pequeños serán los agujeros de la malla. Para los análisis granulométricos se utilizan equipos del tipo Ro-tap machine, que consisten en una serie de mallas apiladas, donde la malla superior posee el menor número de malla (ya sea Tyler o Mesh) y conforme se baja en las mallas, este número aumenta considerablemente. El material se coloca en el equipo y se permite una distribución a lo largo de cada malla, con lo que a su vez se determina el porcentaje de material sólido en cada malla y cuanto atravesó cada una de las mallas. Estos análisis permiten determinar si el proceso de molienda cumple los parámetros de calidad que se puedan necesitar a un cierto tamaño o rango de tamaño de partícula (Ahmed & Shafiur, 2007).

E. Pirólisis

1. Proceso y generalidades

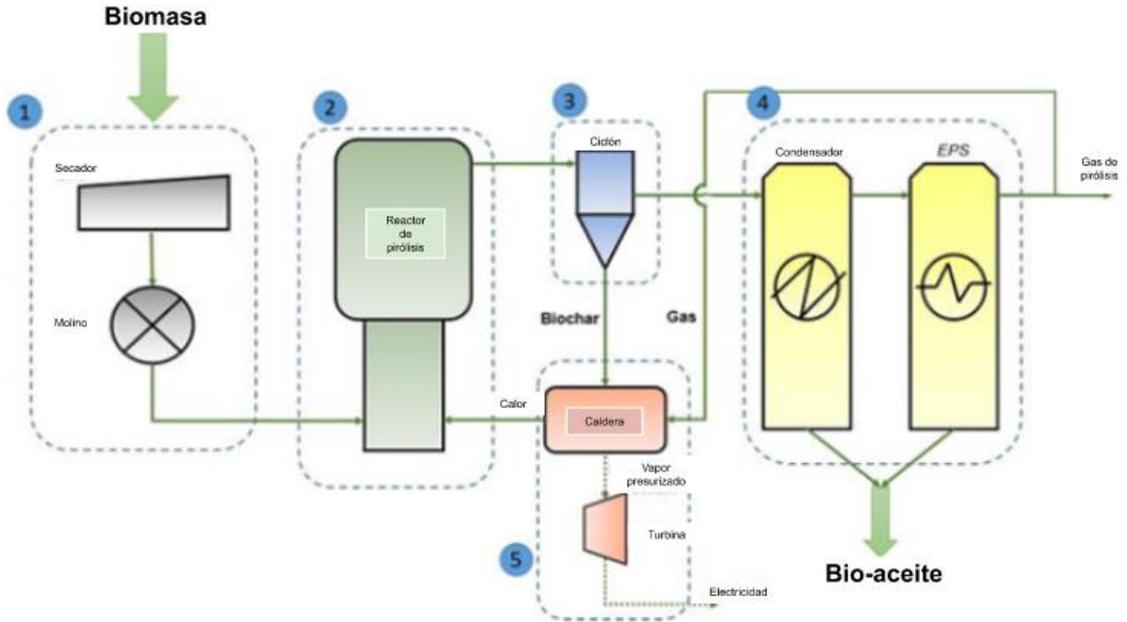
La pirólisis es un proceso termoquímico de descomposición térmica de materia orgánica. Dicho proceso puede realizarse con residuos, tanto plásticos como orgánicos en ausencia de oxígeno para la obtención de productos en tres fases, sólido, líquido y gaseoso. El proceso puede ser autotérmico, donde se introduce una pequeña cantidad de oxígeno para realizar una combustión parcial que aporte calor al proceso. De los productos previamente mencionados, los compuestos con base de carbono se descomponen formando gases, donde hay tanto hidrocarburos condensables como no condensables y un residuo carbonoso sólido o char (es el coque remanente del proceso). La aportación del calor al proceso se divide en dos grupos, los cuales son sistemas alotérmicos y sistemas autotérmicos; en el caso de los sistemas alotérmicos se tiene una transmisión de calor que se lleva a cabo por medio de conducción y

radiación de las paredes, no hay convección dado que es en ausencia de oxígeno, es una transmisión indirecta de energía. La fuente de energía en este caso es la combustión de parte de los gases producidos o incluso del propio char. Existe un proceso de aportación de calor que se realiza mediante la introducción de un sólido inerte precalentado en otro dispositivo aparte, como lo puede ser un combustor o en un gasificador. En el caso de los sistemas autotérmicos, la energía es proporcionada por la combustión de parte de la carga, estos son procesos de calentamiento directo (Castells & García, 2012).

La composición del extracto obtenido del proceso depende variables como la temperatura, el tipo de biomasa del que se parte y de cómo se realiza el proceso de pirólisis en si. Este proceso puede realizarse en presencia de humedad, por lo que se puede partir de biomasa vegetal o primaria. Para la obtención de producto líquido, se realiza el proceso en ausencia total de oxígeno y dado que el proceso es endotérmico, se trabaja en temperaturas que oscilan entre los 500 o 600°C. Durante este proceso se forma un vapor piroleñoso, que es una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos. Luego se forman compuestos líquidos, como aceites, alcoholes y ácidos, finalmente el residuo sólido es el coque remanente, compuesto de alquitrán, carbón y cenizas (Castells & García, 2012).

Un sistema general para el proceso de pirólisis a partir de biomasa es el propuesto por Santos, 2021. El diagrama muestra las operaciones unitarias de preparación de materia prima, siendo el secado y la reducción de tamaño de la materia prima previo al reactor de pirólisis. Luego se muestra el reactor de pirólisis, la separación de los productos en un ciclón y el aprovechamiento de cada uno de los productos de pirólisis.

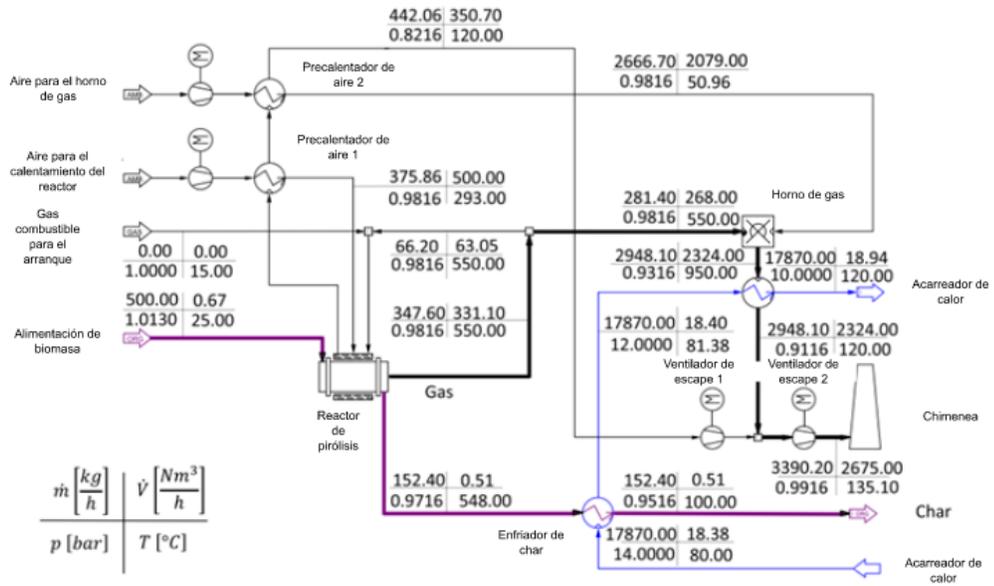
Figura No. 5 Diagrama general del proceso de pirólisis de biomasa



(Santos, 2021)

Por otra parte, en la literatura se muestran propuestas de simulación y diseño de sistemas continuos de pirólisis, Schaffer, 2019, presenta el siguiente balance de masa y energía para el proceso de pirólisis de tallos de algodón.

Figura No. 6 Balance de masa y energía de la pirólisis de tallos de algodón



(Schaffer, Pröll, Al Afif, & Pfeifer, 2019)

2. Tipos de pirólisis

Los distintos tipos de pirólisis se clasifican primordialmente en función a la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y la temperatura final de operación. Los tipos de pirólisis que existen son la carbonización, la pirólisis convencional, la pirólisis rápida, la pirólisis flash, la pirólisis ultrarápida, la pirólisis al vacío, la hidro-pirólisis y la metanopirólisis. En el caso de la carbonización, los tiempos de residencia pueden llegar a tomar varios días con una velocidad de calentamiento muy lenta, donde se llega a una temperatura máxima de operación de 400°C y se favorece el producto sólido o bio-char. Para la pirólisis convencional, los tiempos de residencia pueden llegar a tomar entre 5 y 30 minutos, teniendo una tasa o velocidad de calentamiento lenta, donde se llegan a temperaturas máximas de operación de 600°C y donde se favorece la obtención de los tres productos en las tres fases, el char, el bio-aceite y el producto gaseoso. Para el caso de la pirólisis rápida, los tiempo de residencia son entre 0.5 a 5 segundos, donde la tasa de calentamiento es muy elevada, llegando a temperaturas de operación de 650°C y se favorece la formación del producto gaseoso. Para la pirólisis flash, se puede tener dependiendo del sistema y las condiciones de operación una pirólisis flash que logre favorecer la formación de bio-aceite o de producto gaseoso. En caso general, los tiempos de residencia son menores a 1 segundo, la tasa de calentamiento es elevada y se llegan a temperaturas de operación por debajo de los 650°C. Para la pirólisis ultrarápida, se tienen tiempos de residencia inferiores a 0.5 segundos, teniendo una muy elevada tasa de calentamiento y llegando a temperaturas de operación de 1000°C, en este caso se favorece la formación de productos gaseosos por la gasificación que se da. La pirólisis al vacío tiene tiempos de residencia de 2 a 30 segundos, con una tasa de calentamiento media y llegando a temperaturas operativas de 400°C, en este tipo de operación se favorece la formación de bio-aceite. En el caso de la hidro-pirólisis, los tiempos de residencia son inferiores a 10 segundos, teniendo una tasa de calentamiento elevada y con temperaturas operativas inferiores a 500°C, en este caso se favorece la formación de bio-aceites. Finalmente, la metanopirólisis, donde se tienen tiempos de residencia inferiores a 10 segundos, una tasa de calentamiento elevada y donde se obtienen temperaturas de operación que se encuentran por encima de los 700°C, en este caso se favorece la formación de producto gaseoso (Fernández A. , 2020).

Es importante recalcar que, tal como se mencionó anteriormente, los rendimientos obtenidos para cada producto serán distintos dependiendo del tipo de pirólisis. La siguiente figura según Fernández, 2020, muestra los rendimientos de los productos de pirólisis según el tipo de pirólisis.

Figura No. 7 Rendimientos de los productos de pirólisis dependiendo del tipo de proceso

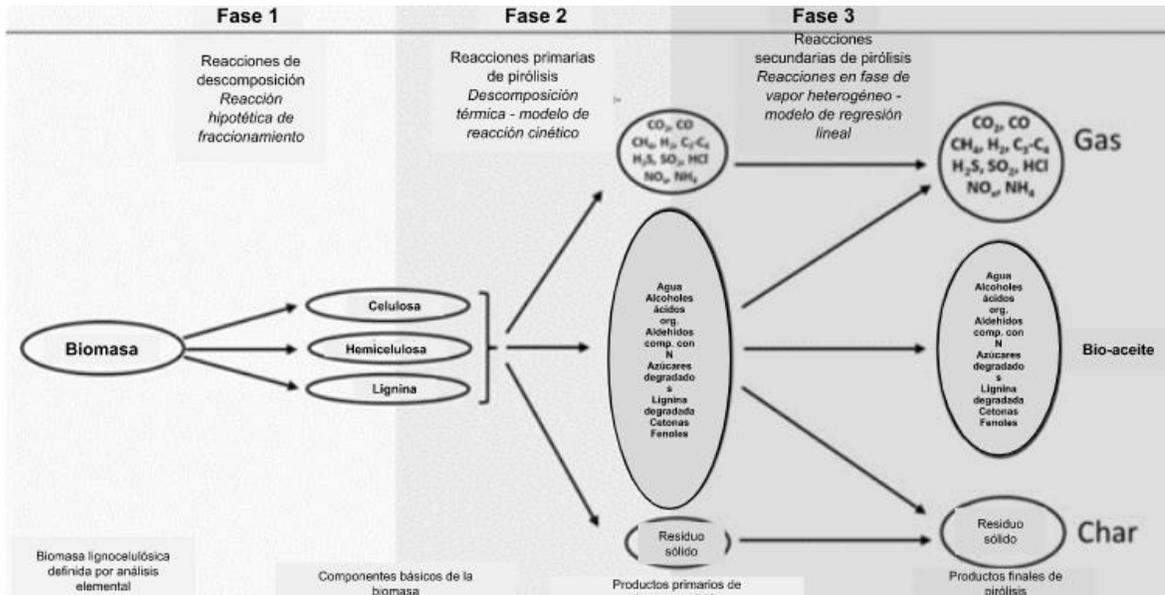
PROCESO	RENDIMIENTOS (%)		
	LIQUIDOS	CHAR	GAS
PIRÓLISIS RÁPIDA	75	12	13
PIRÓLISIS CONVENCIONAL	50	20	30
CARBONIZACIÓN	30	35	35
GASIFICACIÓN	5	10	85

(Fernández A. , 2020)

3. Pirólisis de biomasa

La pirólisis de biomasa puede representarse por medio de tres fases o etapas para llevar a cabo el proceso. La primera fase consiste en reacciones de descomposición, donde la biomasa se descompone en sus componentes esenciales, siendo la celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales a su vez se descomponen en sus monómeros. La composición lignocelulósica, hemicelulósica y de celulosa se define durante el análisis elemental. Luego en la segunda fase, se dan las reacciones primarias de pirólisis, donde se da una descomposición térmica de los monómeros de los componentes previamente mencionados. En esta fase comienzan a formarse las tres fases de los productos de pirólisis, la fase gaseosa, la fase líquida y la fase sólida. En la tercera fase, se tienen las reacciones secundarias de pirólisis, donde se obtiene un vapor heterogéneo, y se dan reacciones en esta fase. En este punto la fase líquida puede vaporizarse y descomponerse a tal punto donde se forman gases no condensables y comienzan a formar parte de la fracción gaseosa. Es en este punto donde se terminan de formar y definir las tres fases de los productos de pirólisis. Se muestra una figura según Fernández, 2020, donde se esquematizan las fases del proceso de pirólisis para biomasa.

Figura No. 8 Esquema de reacción de la pirólisis de biomasa



(Fernández A. , 2020)

En la pirólisis de biomasa los factores principales que afectan al rendimiento de los productos son el tipo de biomasa utilizada y el contenido de humedad inicial. Dependiendo del contenido de humedad inicial se deberá realizar el secado previo al proceso de pirólisis, de modo que se pueda reducir significativamente el contenido de humedad y posteriormente en el proceso de pirólisis realizar el secado de la humedad ligada de la materia prima. El cuantificar la cantidad de agua obtenida en el proceso para biomasa permite la determinación del rendimiento de los productos de pirólisis, el cual depende del tipo de pirólisis realizada y a qué temperatura se debe de realizar el proceso. Algunos ejemplos de rendimientos obtenidos de productos de pirólisis para ciertos tipos de biomasa en función de la temperatura óptima para obtener la mayor cantidad de producto líquido son: para pirólisis de madera, se tiene que el rendimiento máximo de producto líquido es de aproximadamente 51%, con un rendimiento de char de 24% y un rendimiento de producto gaseoso de 25%; para pirólisis de cáscara de arroz, se tiene que el rendimiento máximo de producto líquido es de aproximadamente 34%, con un rendimiento de char de 40% y un rendimiento de producto gaseoso de 30%; para pirólisis de residuos de uva, se tiene que el rendimiento máximo de producto líquido es de aproximadamente 38%, con un rendimiento de char de 37% y un rendimiento de producto gaseoso de 25%; para pirólisis de paja, se tiene que el rendimiento máximo de producto líquido es de aproximadamente 43%, con un rendimiento de char de 33% y un rendimiento de producto gaseoso de 24% (Di Blasi, Signorelli, Di Russo, & Rea, 1999).

4. Productos de pirólisis

El combustible líquido obtenido del proceso de pirólisis puede utilizarse como fuente de energía para otros procesos, como su uso en una caldera en una mezcla de combustibles. Para determinar qué tanta energía suministrará el combustible obtenido se debe de medir su poder calorífico. El poder calorífico en peso o en volumen representa la cantidad de energía liberada por unidad de peso o volumen de carburante como la consecuencia de una reacción química de combustión completa que da lugar a la formación de dióxido de carbono y agua. Se distingue el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI) según la cantidad de agua obtenida en la combustión, que se encuentre en estado líquido o estado vapor respectivamente. La magnitud utilizada en la práctica es el PCI, ya que el agua producida en la combustión se encuentra en forma de vapor en los gases emitidos por los motores y quemadores. Para medir el poder calorífico se realizan pruebas de laboratorio con bombas calorimétricas, donde se cuantifica el calor liberado por el combustible a partir del cambio de temperatura en el medio y de las características caloríficas del calorímetro (Wauquier, 2004).

La composición depende primordialmente del tipo de biomasa utilizada en el proceso de pirólisis, además del tipo de pirólisis y las condiciones de operación utilizadas para el proceso. Los principales componentes del producto líquido de pirólisis son agua, ácidos carboxílicos, ésteres, alcoholes, aldehídos, cetonas, lactonas, piranos, furanos, levoglucosano, fenoles y derivados de lignina. En la composición del producto líquido de pirólisis se tiene que los principales componentes en mayor proporción son agua con 22.0%, ácidos y ésteres con 20.2%, fenoles y derivados de lignina de 23.5%, cetonas y lactonas con 15.0%, alcoholes y aldehídos de 9.3%, furanos con 6.6%, piranos con 1.5% y levoglucosano con 1.6% (Dobele, Urbanovich, Volpert, Kampars, & Samulis, 2007). Por otra parte, para la pirólisis de caña de azúcar se tiene que la composición del producto líquido posee primordialmente fragmentos de lignina con grupos metoxilo, ácidos carboxílicos, ésteres, alcoholes, aldehídos, cetonas, furanos y compuestos fenólicos, teniendo que por lo general se tiene mayor proporción de fragmentos de lignina con grupos metoxilo, seguido de fenoles y finalmente furanos (Van Nam, Quoc, Thanh, & Son, 2020).

El producto sólido de pirólisis es denominado bio-carbón o char, este contiene esencialmente carbón en su estructura, al cual se le realizan análisis proximales para determinar la cantidad de carbono fijo. Este carbón se caracteriza por tener un bajo contenido de humedad y con un poder calorífico elevado, en teoría superior al de la biomasa original. Este a diferencia de los combustibles fósiles, genera muy poca ceniza inorgánica y tal como se mencionó en los tipos de pirólisis, este producto se ve favorecido en la carbonización y en la pirólisis convencional. Ese producto tiene múltiples aplicaciones, desde su

aprovechamiento energético en hornos, hasta utilizarse como carbón activado por sus buenas propiedades como adsorbente (Fernández A. , 2020).

El producto gaseoso es principalmente una mezcla de gases no condensables, de entre los cuales se tiene dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano e hidrógeno. Este producto al igual que el producto sólido se suele aprovechar energéticamente quemándolo en hornos para proporcionar energía en forma de calor o incluso para utilizarse en ciclos de vapor (Fernández A. , 2020).

F. Cinética de reactores

1. Tipos de reactores

Un reactor es una unidad elemental en los procesos químicos ya que es el equipo donde se lleva a cabo la reacción para la obtención de los productos que posterior al reactor deben de purificarse. Existen varios tipos de reactores, pero en caso general, se debe de conocer información de las entradas y salidas; el modelo de contacto, o cómo fluyen los materiales y cómo entran en contacto dentro del reactor, qué tan pronto o qué tan tarde se mezclan; la cinética, que es el estudio de qué tan rápido se lleva a cabo la reacción química, toma en cuenta el tiempo y los fenómenos de transporte y cómo estos llegan a influir sobre la cinética de la reacción. Finalmente se debe de conocer la ecuación de diseño del reactor, que es la que permite dimensionar los reactores en función a la cinética y los flujos de alimentación y salida del mismo (Levenspiel, 2004).

Se pueden distinguir de forma general varios tipos de reactores. Se encuentran los reactores intermitentes o batch, que cómo su nombre lo indica, se alimenta una cantidad fija de alimentación al reactor, se espera a que se dé la reacción dentro del mismo para finalmente descargarlo. Este tipo de reactor puede o no contar con un agitador y se deben de realizar periodos de limpieza al reactor antes de alimentar un nuevo batch al sistema. El siguiente tipo de reactor son los reactores CSTR o reactores continuos con agitación, donde se tiene un flujo de entrada y salida además de un sistema de agitación. Dependiendo del tipo de reacción, ya sea exotérmica o endotérmica se requerirá de una chaqueta para realizar la transferencia de calor. Cabe mencionar que las ecuaciones de diseño entre los dos reactores anteriormente mencionados son distintas. Por otra parte, se encuentran los reactores PFR, o plug Flow reactor, que consiste en una serie de tuberías donde se lleva a cabo la reacción a lo largo del mismo. Este reactor posee la misma ecuación de diseño que el reactor batch con la diferencia de que no se toma en cuenta el tiempo de limpieza no operativo para el dimensionamiento del mismo. Otros tipos de reactores son aquellos con catalizador sólido, como los reactores de lecho fijo y lecho fluidizado, que contienen una cama de catalizadores sólidos, en la mayoría de los casos metálicos, donde conforme entra

la mezcla la reactiva, estos permiten que la reacción se lleve a cabo de manera más rápida y se debe de realizar procesos regenerativos para los catalizadores (Levenspiel, 2004).

2. Análisis cinético

El análisis cinético es el estudio de las reacciones químicas que permiten predecir el comportamiento de una reacción química con el tiempo y con la concentración de los componentes de la mezcla reactiva. Por lo general, uno analiza inicialmente el mecanismo de la reacción que se está llevando a cabo para determinar la velocidad de reacción teórica, que dependiendo de las fases que se trabajen será el modelo de la ecuación. Si se trabaja con soluciones la velocidad de reacción queda en términos de concentraciones, mientras que si se trabaja con una fase gaseosa se debe de trabajar con presiones parciales. Una vez determinada la velocidad de reacción teórica, se debe de analizar el proceso experimentalmente para recaudar datos, de modo que se pueda obtener una expresión de la velocidad de reacción experimental. De forma general, se busca la determinación de la constante de Arrhenius y del orden de reacción y existen múltiples métodos para la determinación de los mismos como el método integral, el método diferencial y el método de fracción de vida. En la actualidad existe una gran cantidad de softwares que permiten el modelado y determinación de las expresiones de velocidad de reacción en base a datos experimentales (Levenspiel, 2004).

3. Cinética en el proceso de pirólisis

Para el modelaje cinético del proceso de pirólisis se deben de tomar en cuenta dos fases del proceso. La primera fase donde la biomasa se descompone en sus componentes básicos, el cual no forma parte del proceso de pirólisis, pero se toma en cuenta para obtener la expresión de la velocidad de reacción. En esta fase, se representa la celulosa y la hemicelulosa por sus monómeros, de los cuales su estructura se mantiene relativamente fija. Por otra parte, la lignina representa múltiples monómeros, teniendo siete monómeros en total, estos dependen de la composición de la biomasa. En la segunda fase, se realiza la expresión de la velocidad de reacción para las reacciones de pirólisis primaria. Se interrelaciona la descomposición individual de celulosa, hemicelulosa y ligninas. Teniendo esto en consideración, se puede realizar la expresión de la velocidad de reacción en términos másicos o de temperatura. Según Fernández, 2020, la expresión de la velocidad de reacción para el proceso de pirólisis se puede considerar de la siguiente manera.

Ecuación no. 1 Ecuación de la velocidad de reacción teórica para el proceso de pirólisis

$$r = k \cdot T^n \cdot e^{-E/RT}$$

(Fernández A. , 2020)

Donde r representa la velocidad de reacción, k es el factor pre-exponencial, T la temperatura absoluta del sistema, E la energía de activación, R la constante de gases ideales y n el orden de reacción. En la segunda fase se tiene la descomposición térmica, siendo las reacciones primarias de pirólisis las que se llevan a cabo durante esta fase. En esta fase se encuentran las reacciones secundarias en fase de vapor, siendo complejas incluyendo polimerizaciones parcialmente catalíticas y reacciones de recombinación que complican el modelo cinético (Fernández A. , 2020).

G. Propiedades fisicoquímicas

1. Densidad

La densidad se define como el volumen que ocupa una masa determinada, en el caso de los sólidos se puede analizar la densidad de una masa individual o la densidad de una masa de sólidos apilados y dispersos. Esto último se denomina densidad de bulto, el cual toma en cuenta una cantidad de sólidos apilados. Se distinguen tres tipos de densidad de bulto, la densidad de bulto aireada que es la masa que ocupa un volumen de sólidos apilados tomando en cuenta la porosidad de los sólidos apilados; la densidad de bulto compacta donde se reduce la porosidad de los sólidos y se ve el efecto en el volumen, que por lo general se compactan los sólidos, por lo que si se mide la densidad de bulto en recipientes cilíndricos, este tendrá un valor mayor a la densidad de bulto aireada; finalmente, la densidad de bulto de trabajo que correlaciona ambas densidades de bulto y se relacionan por medio de un factor de compresibilidad. En el caso de los líquidos, la densidad al igual que la viscosidad, son de las propiedades físicas más importantes a medir para las propiedades de transporte en el estudio de flujo de fluidos. Estas influyen directamente en múltiples propiedades del fluido esenciales para el dimensionamiento de equipos de transporte de sólidos. La densidad de igual manera se define como la masa del fluido líquido por una unidad de volumen determinada y a diferencia de los sólidos, este valor varía esencialmente con la temperatura y la presión, aunque el efecto de la presión no es tan representativo en fluidos incompresibles (Ahmed & Shafiur, 2007).

2. Porcentaje de humedad

La humedad es la cantidad de agua retenida o absorbida sobre un cuerpo o material sólido, este se puede expresar en términos de un porcentaje al relacionar la masa de agua en el cuerpo o material sólido con la masa de sólido total húmedo. El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se puede describir en función del porcentaje en peso de humedad. En análisis de transferencia de masa se puede analizar la humedad en base húmeda o en base seca, este segundo es relacionando la masa de humedad con la masa de sólido seco. En un material sólido hay tres tipos de humedades que se encuentran físicamente en el mismo. La humedad ligada, que se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura; la humedad no ligada que se refiere a la humedad contenida dentro de una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual que la del líquido puro a la misma temperatura; y finalmente la humedad libre, que consiste en la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio. En los procesos de secado únicamente puede evaporarse humedad libre, el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en la fase gaseosa (durante el secado) (Treybal, 1988).

3. Cromatografía de gases

La cromatografía es una técnica de separación para cuantificar la separación y cuantificación de una mezcla con varios analitos. Este método separa los analitos que son acarreados por una fase móvil a través de una columna que contiene una fase estacionaria. En la cromatografía de gases, la fase móvil es un gas inerte, como el nitrógeno o el helio. De tal manera, los analitos pasan a través de la columna y por su afinidad se quedan atrapados en la columna y después eluyen a diferentes tiempos. Es altamente utilizado para sustancias con alta volatilidad, en especial compuestos orgánicos (Skoog, 2015).

El cromatógrafo de gases está compuesto por: una fuente de gas, un sistema de inyección, un horno con la columna cromatográfica, un sistema de detección y por último, un sistema de registro. El detector es lo que cuantifica los analitos dentro de las muestras, por lo cual se puede optar por diferentes opciones. Una de las más utilizadas es la detección de ionización de llama, la cual consiste en la combustión del gas proveniente de la columna mezclado con hidrógeno para medir la ionización de llama con un colector de iones polarizado. Otro método de detección es el de masas, donde se utiliza normalmente un cuadrupolo para separar los iones por su relación masa-carga (Skoog, 2015).

4. Análisis elemental

El análisis elemental se realiza para determinar la cantidad de un elemento en particular dentro de algún material o molécula. El análisis elemental se puede dividir en dos, un análisis cuantitativo y un análisis cualitativo. El análisis cualitativo donde se determina qué elementos están presentes o la presencia de un elemento particular y el análisis cuantitativo que permite cuantificar y determinar cuánto de un material está presente. El análisis elemental se puede realizar tanto a sólidos como líquidos y gases, algunos de los métodos utilizados para el análisis elemental caen en las categorías de métodos gravimétricos, métodos volumétricos y métodos colorimétricos. En los métodos gravimétricos la muestra es separada de una solución por medio de un precipitado al cual se le mide su masa; en los métodos volumétricos normalmente se involucra la determinación del volumen de una sustancia que se combina con otra sustancia en proporciones conocidas; finalmente, los métodos colorimétricos o espectroscópicos, donde los análisis requieren la adición de un agente orgánico complejo (Raja & Barron, 2021).

5. Espectroscopía infrarroja

La región infrarroja del espectro electromagnético se divide en tres partes las cuales son el infrarrojo cercano (de 0.8 a 2.5 μm), el infrarrojo medio (de 2.5 a 50 μm) y el infrarrojo lejano (de 50 a 1000 μm). Aunque la región más importante para el análisis es entre 2.5 y 25 μm . Las radiaciones infrarrojas pueden estimular moléculas haciendo que estas vibren y a partir de estas vibraciones se puede observar en los espectros infrarrojos, el cual es una gráfica de la energía absorbida por una molécula en función de la frecuencia o de la longitud de onda de la luz. Lo que se observa en estos espectros son los grupos funcionales orgánicos (Wade, 2012).

En la espectroscopía infrarroja se utilizan dos tipos de espectrómetros, los de tipo dispersivo y los de transformada de Fourier. En los de tipo dispersivo, las fuentes de IR son sólidos calentados, y los detectores responden a calor, en lugar de responder a los fotones. Los componentes ópticos de estos instrumentos están contruidos de sales pulidas, como el cloruro de sodio o el bromuro de potasio. En los de transformada de Fourier, se detectan longitudes de onda IR en todo momento, poseen una potencia recolectora de luz más grande que los instrumentos dispersivos y una mejor precisión. Los cálculos de la transformada de Fourier se realizan por computadora con un software apropiado para la visualización de los espectros y de esta manera detectar los grupos funcionales del analito (Skoog, 2015).

6. Poder calorífico

Se define el poder calorífico como la cantidad de energía en forma de calor proporcionada por una unidad de masa de una sustancia o unidad de volumen del mismo. Esto aplica con combustibles cuando se oxida de forma completa, por lo que es una de las propiedades más importantes a conocer de los combustibles. El poder calorífico de un combustible se puede dividir en dos tipos, el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior. El poder calorífico superior se define cuando se supone que todos los elementos de una combustión son medidos a 0°C, es decir, la mezcla de combustible y aire, y los productos obtenidos después son llevados de igual manera a 0°C después de la combustión. Por lo que el vapor de agua presente en el combustible se condensará y se determina de esta manera la energía proporcionada por el combustible y se puede determinar la energía por unidad de masa de vapor condensado. Por otra parte el poder calorífico inferior, que considera el vapor de agua contenido en los gases de la combustión no llega a condensar, lo que implica que no hay aporte adicional de calor por condensación del vapor de agua, por lo que únicamente se tiene el calor de la oxidación del combustible (Fernández J. , 2008).

Dado el bajo contenido de humedad que se obtiene en el char de pirólisis, los valores de poder calorífico son relativamente altos. El poder calorífico que se obtiene para el char obtenido de pirólisis de madera es de 28.5 kJ/g, valor relativamente cercano al poder calorífico del grafito que es de 32.806 kJ/g (Mazlan, Uemura, Osman, & Yusup, 2015).

7. Análisis proximal

El análisis proximal de un combustible, en especial carbono, permite determinar porcentualmente propiedades de los combustibles relevantes para el proceso de combustión. Permite determinar porcentualmente la cantidad de material que quema en un estado gaseoso, siendo este el porcentaje de material volátil; el porcentaje de humedad presente en el combustible ya que conforme mayor sea el porcentaje de humedad, menor será el poder calorífico del combustible. Además, permite determinar el porcentaje de desechos inorgánicos, correspondiente al porcentaje de cenizas y la cantidad de material que quema en un estado sólido, correspondiente al porcentaje de carbono fijo. Se busca que tanto el porcentaje de humedad, el porcentaje de cenizas y el porcentaje de material volátil sean lo más bajos posibles, dado que conforme mayor es el porcentaje de carbono fijo en el combustible, mayor es el rendimiento del combustible (Ribeiro, Oliveira, & Silva, 2018).

Algunos análisis proximales del char obtenido del proceso de pirólisis son para la pirólisis de granos utilizados para la producción de cerveza, donde al realizar la pirólisis a 500°C se obtiene un rendimiento de char del 25.9% con un contenido de cenizas del 13.08%, un contenido de material volátil del 6.89% y un contenido fijo en carbonos del 80.03% (Olszewski, Arauzo, Maziarka, Ronsse, & Kruse, 2019). Para la pirólisis de paja de trigo se tiene que el análisis proximal del char cuando se tiene un tiempo de residencia de 8 horas, se tiene un contenido de carbono fijo de 71.4%, un contenido de cenizas de 17.1% y un porcentaje de material volátil de 11.5%. Para la pirólisis del tallo de maíz se tiene que el contenido de carbono fijo es de 56.5%, con un contenido de cenizas de 18.1% y un contenido de material volátil de 25.4% (Sun, He, Pan, & Zhang, 2016). Para el análisis proximal de la madera, se tiene que el char posee un contenido de humedad del 2.9%, un porcentaje de cenizas de 3.0%, un porcentaje de material volátil de 42.5% y un porcentaje de carbono fijo de 51.6% (Mazlan, Uemura, Osman, & Yusup, 2015).

8. Viscosidad

La viscosidad es una de las propiedades más importantes a determinar para los fluidos incompresibles, ya que dependiendo del valor de la viscosidad se realizarán cambios radicales no solo en la línea de transporte del fluido sino que también en el proceso en general. La viscosidad se define como la relación entre la tensión de corte con la velocidad de corte de un fluido. Otra definición es que la viscosidad es la oposición al cambio de velocidad de un fluido y este valor depende de la temperatura, a menores temperatura mayor será la viscosidad y a mayores temperaturas menor será la viscosidad. La viscosidad se suele medir en centipoise (cP). Por otra parte, se tiene la viscosidad cinemática, que es la relación entre la viscosidad dinámica previamente descrita con la densidad del fluido. Esta viscosidad al igual que la dinámica varía con la temperatura, pero esta varía en intervalos más estrechos que la viscosidad dinámica (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

La viscosidad del bio-aceite de pirólisis obtenido depende de la biomasa utilizada, además del tipo de pirólisis realizado y la fracción de producto pesado obtenido. Algunos valores de viscosidad cinemática para bio-aceites provenientes de biomasa son: 4.6 cSt para la pirólisis de residuos de madera de Caoba, 50 cSt para la pirólisis de roble y 28 cSt para la pirólisis de madera de pino (Santos, 2021).

9. Contenido de nitrógeno

El contenido de nitrógeno no solo en combustibles, sino que en una gran mayoría de materiales es por medio del método Kjeldahl para cuantificación de nitrógeno. Este método se puede utilizar tanto en muestras orgánicas como en muestras inorgánicas. El proceso se divide en tres fases, la primera siendo

una digestión ácida, luego una destilación y finalmente una valoración. En la digestión se busca romper todos los enlaces de nitrógeno de la muestra y convertir todo el nitrógeno unido en iones amonio, se utiliza ácido sulfúrico para lograr esta parte del proceso. El proceso se lleva a cabo a elevadas temperaturas porque entre mayor sea la temperatura, menor será el tiempo requerido de digestión. En este paso también se suele añadir sulfato de potasio para aumentar el punto de ebullición del ácido sulfúrico y se añaden catalizadores para aumentar la velocidad de reacción. Una vez se realiza la digestión y se lleva la muestra a temperatura ambiente se realiza el proceso de destilación, donde se utiliza hidróxido de sodio para neutralizar la solución y formar amoniaco, el cual es arrastrado por una corriente de vapor de agua hacia un receptor de destilado. En el receptor de destilado se captura el gas que por lo general es ácido bórico para formar iones amoniaco. Finalmente, en la valoración, se utiliza una solución ácida, por lo general ácido sulfúrico utilizando un indicador para determinar el punto de viraje y se anota el volumen utilizado de solución ácida para cuantificar posteriormente el porcentaje de nitrógeno.

El porcentaje de nitrógeno que se obtiene en el char luego del proceso de pirólisis depende de la biomasa utilizada. El char obtenido del proceso de pirólisis de madera posee un porcentaje de nitrógeno de 0.4%, valor bajo debido a que predomina la cantidad de carbono, oxígeno e hidrógeno en el char (Mazlan, Uemura, Osman, & Yusup, 2015).

V. ANTECEDENTES

A. Situación actual de las plantaciones de aguacate y aprovechamiento de residuos a nivel nacional e internacional

En Guatemala se tiene un alto cultivo de aguacate, ya que este al igual que México y otros países centroamericanos son los centros de origen de este cultivo a nivel mundial. Debido a ello, el país cuenta con una alta producción de aguacate tanto para consumo local como para su exportación a otros países, algunos de los países a los cuales se exporta son Holanda, Inglaterra, España, El Salvador, Honduras, Nicaragua, entre otros. Teniendo esto en cuenta es natural que existan múltiples cultivos de aguacate en todo el país, los principales departamentos productores de aguacate Hass y Booth-8 son: Guatemala, Chimaltenango, Sacatepéquez, Alta Verapaz, Baja Verapaz, Quiché, San Marcos, Quetzaltenango, Huehuetenango, Jalapa, Retalhuleu, Escuintla y Petén (Agexport, 2022).

A nivel mundial, se tiene que el aguacate es de las principales frutas tropicales comercializadas y consumidas a nivel mundial junto con el mango, la piña y la papaya. Los principales países productores de aguacate a nivel mundial son México, siendo el mayor productor a nivel mundial con el 29.4%, República Dominicana con 7.4% y Perú con el 5.7% de la producción mundial, siendo estos los tres productores más grandes a nivel mundial. Guatemala se encuentra en el décimo cuarto lugar con respecto a la producción mundial de aguacate con el 2.1% (Ministerio de Economía de Guatemala, 2017). En el 2020, la producción mundial aumentó un 8.2% con respecto al año anterior, sumando una cantidad aproximada de 2.3 millones de toneladas de aguacate producidas y comercializadas a nivel mundial (Food and Agriculture Organization (FAO), 2020).

Por otra parte, según el INE en la hoja de balance de alimentos del año 2020 en Guatemala hubo un suministro disponible de 131,417 toneladas métricas, correspondientes a lo producido en los departamentos anteriormente mencionados. Por otra parte, del suministro disponible hubo un total de 26,582 toneladas métricas de pérdidas, mermas y desperdicios. Según un informe estadístico del ministerio de energía y minas del 2017, se buscó la implementación de la instalación de unidades de producción de biogás en el vertedero el trébol, con la finalidad de aprovechamiento de biomasa y con una potencial potencia de hasta 3 MW solo en dicho vertedero, además de que el biogás representó una generación de 17.56 GWh en ese mismo año (Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, 2017). Por otro lado, se aprovecha cierto tipo de biomasa para producción de energía, en Guatemala se realizan procesos de cogeneración donde se aprovecha la biomasa para la producción de energía eléctrica (Incyt,

2018), además la biomasa representó una generación de 1577.67 GWh en el 2017 (Ministerio de Energía y Minas de Guatemala, 2017).

Por otra parte, Zúñiga, 2021, aprovechó la cáscara de aguacate como material biosorbente para reducir la cantidad de cromo (VI) acuoso en soluciones de desecho, llegando a un rendimiento de 70.95% para un diámetro de partícula de 150 μm y un tiempo de 10 minutos (Zúñiga Socop, 2021). Otro uso que se ha encontrado para la cáscara de aguacate es por su alto contenido de antioxidantes, Rotta, 2016, determinó la posibilidad de realizar una formulación de té a partir de la cáscara de aguacate debido a su contenido fenólico y de flavonoides, representando un contenido mayor al del té de manzana (Rotta, y otros, 2016).

Finalmente, Hennessey, 2017, aprovechó la semilla de aguacate como colorante natural y el aceite de mesocarpio como componentes funcionales en un jabón líquido, obteniendo que la semilla de aguacate posee un alto grado de insaturaciones y de índice de saponificación lo que lo favorece para la producción de jabones a un pH de 6.2 (Hennessey Ramos, 2017). Además, la empresa mexicana Biofase, aprovecha la semilla de aguacate para la producción de biopolímeros, siendo principalmente los denominados plásticos de un solo uso como las pajillas o cubiertos plásticos (Biofase, 2022).

B. Proceso actual y avances del proceso de pirólisis

El proceso de pirólisis es un proceso de tratamiento térmico de biomasa y plásticos en ausencia de oxígeno para la obtención de productos en tres fases, sólido, líquido y gas. La proporción de los productos varía según el tiempo de material. Los procesos de pirólisis de biomasa se realizan en distintos rangos de temperatura dependiendo de la composición del material; para la hemicelulosa se realiza el proceso de pirólisis en rangos de 200 a 300°C, para la celulosa de 300 a 400°C y para la lignina de 250 a 500°C. Arteaga, 2012, realizó la pirólisis de residuos de palma africana para la obtención de biocombustibles, operando a un rango de temperatura de 500 y 700°C, obteniendo un rendimiento de producto líquido de 23.3% (Arteaga, Arenas, López, Sánchez, & Zapata, 2012).

Actualmente, se realiza el proceso de pirólisis rápida y pirólisis catalítica. Gupta, 2012, realizó una pirólisis catalítica de biomasa utilizando un catalizador de $\text{H}^+\text{ZSM-5}$ en un ambiente de hidrógeno y obtuvo un rendimiento de 36.2% en peso de carbón y obtuvo que el catalizador permitió la selectividad en la formación de compuestos aromáticos en el producto líquido (Gupta, Adhikari, & Thangalazhy-

Gopakumar, 2012). Por otra parte para la pirólisis rápida, Pretell, 2016, redujo el tiempo de residencia en el proceso y operando a un rango de temperaturas de entre 500 y 600°C a una tasa de 9°C/min, obtuvo un rendimiento de producto líquido de 55.35% en peso (Pretell Huamán, 2016).

C. Pirólisis de aguacate

Para la pirólisis de aguacate se puede utilizar primordialmente los principales residuos, que son la cáscara y la semilla del fruto. Yarbay, 2020, realizó un estudio experimental de la pirólisis de la semilla de aguacate para la producción de combustible líquido, realizando el proceso de pirólisis a 500°C con una tasa de calentamiento de 10°C/min y un tiempo de retención de 20 minutos. El autor obtuvo un rendimiento de producto líquido de 32.0%, un rendimiento de producto sólido de 34.0%, un rendimiento de producto gaseoso de 34% en base seca para la biomasa y una conversión total de la materia prima del 67% (Yarbay, Dolas, Yargıç, & Özbay, 2020).

Por otra parte, Durak, 2014, realizó un estudio del efecto de la temperatura y catalítico en el proceso de pirólisis para la producción de bio-aceite y bio-char de semillas de aguacate. Realizó el proceso de pirólisis a un rango de temperatura de operación de 400 a 600°C a tasa de 50°C/min y realizando el proceso sin catalizador y utilizando KOH y Al₂O₃ como catalizadores. El autor obtuvo el mayor rendimiento de producto líquido al utilizar 10% de KOH como catalizador a 600°C, obteniendo un rendimiento de 37.5°C para un diámetro de partícula entre 0.150 y 0.224 mm. Obtuvo para el proceso sin catalizador una conversión de 73.25% a 400°C con rendimientos de producto sólido de 26.75%, de 28.10% para el producto líquido y 45.15% para el gas en base seca. Además, obtuvo la composición del producto líquido por medio de cromatografía de gases obteniendo en mayor proporción aromáticos, naftenos (alcanos cíclicos), alcanos lineales, furanos, ácidos carboxílicos y ésteres (Durak & Aysu, 2014).

D. Aplicación de los productos de pirólisis

Los productos obtenidos del proceso de pirólisis consisten en un producto sólido, líquido y gaseoso y cada uno posee aplicaciones variadas. En el caso del producto líquido, Gutiérrez, 2019, realizó un análisis de aprovechamiento de bioaceite pirolítico en motores a reacción, motores diésel, calderas y bioexplosivos. El autor obtuvo resultados satisfactorios para cada maquinaria mencionada previamente, teniendo un desempeño similar al de un combustible fósil en algunos casos y en otros un desempeño

menor a un combustible fósil. Por otra parte, menciona que se debe de realizar tratamientos al bioaceite ya que de lo contrario podría afectar la fiabilidad de las mecánicas (Gutiérrez, 2019).

Para el producto sólido, al ser un biocarbón este puede aprovecharse energéticamente como una fuente de energía en forma de calor y utilizarse en procesos de generación de energía eléctrica, en calderas o hornos. Según Castro, 2018, el producto sólido de pirólisis tiene un porcentaje de carbono fijo de 65.06% y un poder calorífico de 30380.07 kJ/kg por lo que puede aprovecharse energéticamente en los equipos mencionados anteriormente (Castro, 2018). Por otra parte, el producto sólido también puede utilizarse como un carbón activado para procesos de adsorción. Leite, 2017, realizó un estudio del carbón activado obtenido de la semilla de aguacate, utilizándolo para la remoción de compuestos orgánicos y obtuvo, para un análisis de distintos tamaños de partícula del carbón activado, de que es muy efectivo para la adsorción de compuestos orgánicos debido a sus superficies hidrofílicas y que tienen predominantemente grupo ácidos en sus superficies (Leite, y otros, 2017).

Finalmente, el producto gaseoso posee en su composición mayoritariamente monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano, por lo que estos pueden aprovecharse energéticamente en procesos de combustión. Santos, 2021, indica que se puede aprovechar el gas producido en la pirólisis en reactores de pirólisis rápida, quemando el gas en una caldera y aprovechar el calor producido para proveer energía al mismo proceso de pirólisis (Santos, 2021).

VI. METODOLOGÍA

A. Preparación de la muestra

1. Equipo y materiales requeridos

Para la preparación de la muestra, siendo la materia prima que se utilizó en los procesos y análisis posteriores se utilizó:

- Cuarto frío
- 2 bolsas plásticas

2. Clasificación de la materia prima

La materia prima utilizada para los análisis realizados consistió primordialmente en la cáscara y la semilla del aguacate, por lo que inicialmente se recolectó la materia prima. La recolección de la materia prima consistió primordialmente en residuos domiciliarios y de un puesto de alimentos callejero. Se verificó que el material recolectado no tuviera ninguna traza de cualquier otro tipo de residuo, por lo que se separó la cáscara y la semilla de aguacate del resto de residuos que constaba primordialmente de pedazos de papel y otros residuos orgánicos. Una vez recolectada la materia prima, esta se separó individualmente en dos bolsas plásticas distintas, para la cáscara y para la semilla respectivamente, dado que posteriormente se realizó un análisis por separado a cada material.

3. Almacenamiento de la materia prima

Una vez clasificada la materia prima y colocada en las bolsas plásticas esta se almacenó en el cuarto frío del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. La materia prima se almacenó a una temperatura entre 3 y 4°C para evitar un avance en la descomposición de los mismos.

B. Caracterización de la materia prima

1. Equipo y materiales requeridos

Para la caracterización de la materia prima utilizada para los análisis y procesos posteriores se utilizó el siguiente equipo y materiales:

- 1 metro Milwaukee de 3.5 m de largo con incertidumbre de ± 0.05 mm.
- 1 balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.
- 1 cubeta plástica de 20 L de capacidad.

- 1 balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con una capacidad de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.
- 1 báscula Ohaus, Serie 3000, con una precisión de ± 0.01 kg.
- 1 cuchillo de cocina.

2. Medición de tamaño de partícula

- Dada la variabilidad que existe en el tamaño de cada fruto, tanto de cáscara como semilla, se trabajó con 10 unidades de cada material y se relacionó con la longitud de los mismos.
- Para la medición de tamaño de partícula de la semilla de aguacate se colocaron 10 semillas en una línea recta uno tras otro, asegurando que hubiese contacto entre cada semilla, tal como se observa en la ilustración no. 2 en la sección de anexos. Se utilizó tanto semillas en buen estado, es decir que estuviesen completas y fuesen esféricas, como semillas dañadas, a las cuales les faltaba un pedazo del mismo.
- Con la ayuda del metro, se midió la distancia desde la primera semilla hasta la décima semilla, es decir, de un extremo a otro de la fila de sólidos.
- Para determinar el tamaño de partícula se relacionó la longitud total con el número de unidades de semilla de aguacate para obtener un tamaño individual de partícula.
- Se realizó el proceso en cuadruplicado y se realizó el análisis estadístico de la serie de datos. Además, se realizó cuadruplicado de modo que si hubiese algún dato que presentara una muy alta variabilidad, se pudiera realizar una prueba Q para aceptar o rechazar ese dato dudoso y contar aún con 3 datos para tener un análisis estadístico.
- Para la cáscara de aguacate se realizó un procedimiento similar, se tomó 10 unidades de cáscara de aguacate para colocarlos en una fila recta y medir la longitud de dicho número de unidades. Tal como se observa en la ilustración no. 3 en la sección de anexos
- Dado que la materia prima utilizada era primordialmente residuos domiciliarios y de un puesto de alimentos callejero, se tenían cáscaras a las cuales se les realizó un corte longitudinal por lo que se tenían las dos mitades de cáscara del fruto original. De igual manera que con la semilla, se utilizó cáscaras en buen estado, como cáscaras dañadas y con cierto grado de descomposición.
- Con la ayuda del metro, se midió la distancia desde la primera cáscara hasta la décima cáscara, es decir, de un extremo a otro de la fila de sólidos.
- Se realizó el mismo procedimiento que con la semilla para determinar el tamaño de partícula.

- Se realizó el proceso en cuadruplicado y se realizó el análisis estadístico de la serie de datos. Además, se realizó cuadruplicado de modo que si hubiese algún dato que presentara una alta variabilidad, se pudiera realizar una prueba Q para aceptar o rechazar ese dato dudoso y contar aún con 3 datos para tener un análisis estadístico.

3. Medición de masa individual de partícula

- Para la medición de masa individual de partícula se seleccionó al azar 10 unidades de cada material utilizado, es decir, de cáscara y de semilla de aguacate. Esto fue por la alta variabilidad que presentan cada fruto en cuanto a tamaño, debido a la diferencia en el contenido de pulpa, el tamaño de semilla y la cantidad de cáscara.
- Para la medición de masa de cada material se utilizó la balanza semianalítica y se anotó la masa individual de cada muestra tomada.
- Se repitió este procedimiento para las 10 muestras de cada material, por lo que se realizó para 10 muestras de la cáscara y para 10 muestras de la semilla. Dada la alta variabilidad del fruto, al contar con 10 mediciones se puede llegar a tener un valor más aproximado de la media poblacional teniendo una distribución normal. Se realizó el análisis estadístico de los datos para cada material.

4. Medición de densidades de bulto

- Se realizó la medición de densidad de bulto aireada y densidad de bulto compacta de la materia prima, es decir, el conjunto de cáscara con semilla de aguacate. Se midió en un primer punto la densidad de bulto aireada y posteriormente la densidad de bulto compacta.
- Previo a las mediciones necesarias para el cálculo de la densidad de bulto aireada y compacta, se midió la masa de la materia prima con la ayuda de la báscula.
- Para las mediciones se utilizó la cubeta plástica con capacidad de 20 L y el metro Milwaukee.
- Se midió inicialmente el diámetro de la cubeta con el metro para calcular posteriormente el volumen.
- Luego de medir el diámetro de la cubeta, se colocó el material en la cubeta dejándolo caer sin mover mucho la cubeta para no alterar la porosidad de los sólidos apilados en la cubeta, tal como se observa en la ilustración no. 1 en la sección de anexos.
- Con la ayuda del metro, se midió la altura correspondiente a los sólidos apilados. Con la altura medida y el diámetro de la cubeta se determinó el volumen correspondiente y

relacionándolo con la masa de la materia prima inicial para determinar la densidad de bulto aireada.

- Luego de medir la altura de la densidad de bulto aireada, se sacudió la cubeta de modo que los sólidos se configuraran de modo que la porosidad de los sólidos apilados se redujera significativamente.
- Luego de sacudir la cubeta, se midió la nueva altura correspondiente a los sólidos apilados de modo que se determinó el nuevo volumen y relacionándolo con la masa inicial de la materia prima se determinó la densidad de bulto compacta.
- Luego de realizar las mediciones se descargó la cubeta, removiendo cualquier remanente de cáscara que quedara sobre la superficie de la cubeta.
- Se realizó el procedimiento en cuadruplicado para ambas densidades de bulto y se realizó el análisis estadístico de la serie de datos. Además, se realizó un cuadruplicado de modo que si hubiese un dato dudoso con alta variabilidad se pudiera hacer una prueba Q para aceptar o rechazar ese dato dudoso y contar aún con 3 datos para tener un análisis estadístico.
- La densidad de bulto de trabajo se determinó por medio de cálculos, determinado el factor de compresibilidad utilizando la densidad de bulto aireada y la densidad de bulto compacta. Esto se realizó para cada una de las mediciones y se realizó de igual manera el análisis estadístico de los datos.

5. Medición de humedad de la materia prima

- Para la medición de la humedad de la materia prima se utilizó la balanza de humedad de modo que se pudiera contar con el valor inicial de humedad previo al secado.
- Para las muestras de semilla de aguacate, se cortó trozos de los mismos utilizando el cuchillo de cocina, asegurando que fuesen lo suficientemente grandes para que tuvieran una masa superior a 0.500 g de modo que la balanza de humedad pudiera realizar el secado. Tal como se observa en la ilustración no. 4 en la sección de anexos.
- Una vez cortado el trozo de la muestra de la semilla de aguacate, se preparó la balanza de humedad cargando la configuración “DEFAULT” correspondiente a una corrida de 30 minutos a 100°C.
- Una vez cargada la configuración en la balanza de humedad, se taró el plato de muestras, se colocó el trozo de la muestra cortada asegurando que tuviese una masa superior a

0.500 g, se anotó la masa correspondiente y se cerró la tapa de la balanza de humedad permitiendo que iniciara la corrida.

- Luego de que transcurriera el tiempo de la corrida en la balanza de humedad, se desplegó el valor del porcentaje de humedad de la semilla y se anotó el valor del mismo.
- Se repitió el procedimiento anterior en cuadruplicado, utilizando para cada corrida una semilla nueva y cortando trozos con una masa superior a 0.500 g.
- Para la medición de la humedad de la cáscara se realizó un procedimiento similar al de la semilla, cortando trozos de cáscara de modo que tuvieran una masa superior a 0.500 g.
- Se utilizó trozos de cáscara de aguacate que tuvieran residuos de pulpa, así como trozos de cáscara sin residuos de pulpa.
- Se cargó la misma configuración en la balanza de humedad, utilizando la configuración “DEFAULT” correspondiente a una corrida de 30 minutos a 100°C.
- Posteriormente, se taró el plato de muestras de la balanza de humedad y se colocó la muestra de cáscara y se cerró la tapa de la balanza de humedad permitiendo que iniciara la corrida.
- Luego de que transcurriera el tiempo de la corrida en la balanza de humedad, se desplegó el valor del porcentaje de humedad de la cáscara y se anotó el valor del mismo.
- Se repitió el procedimiento anterior en cuadruplicado, utilizando para cada corrida una nueva muestra de cáscara y cortando trozos con una masa superior a 0.500 g.

C. Secado de la materia prima

1. Equipo y materiales requeridos

Para realizar el proceso de secado de la materia prima se utilizó los siguientes equipos y materiales:

- 1 bandeja metálica de 60 cm de largo por 30 cm de ancho y 5 cm de altura.
- 1 balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con capacidad de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.
- 1 horno deshidratador de bandejas.
- 1 balanza analítica Ohaus, Pioneer Series, modelo PA114, con rango de medición de 0 a 110 g y una incertidumbre de ± 0.0001 g.
- 1 termómetro Extech Instruments, modelo TM26, con rango de medición de -40 a 200°C y una incertidumbre de ± 0.05 °C.

- 1 recipiente plástico con tapadera.
- 1 báscula Ohaus, serie 3000, con una precisión de ± 0.01 kg.
- 1 bandeja con malla metálica.
- 1 bandeja plástica de cocina.

2. Secado solar de la materia prima

- Para el secado solar se siguió el procedimiento indicado el manual del secado solar técnico de alimentos según Vázquez, 1997, modificado para la cáscara y la semilla del aguacate (Vázquez, Arnéz, Fernández, & de Dios, 1997).
- Para el secado solar se colocó 1.5 kg de materia prima sobre la bandeja metálica, distribuyendo todo el material sobre la bandeja asegurando de que todas las cáscaras tuviesen la superficie interna expuesta para el secado. Tal como se observa en la ilustración no. 5 en la sección de anexos.
- Se colocó la bandeja en un espacio abierto donde recibiera durante tiempos prolongados radiación solar.
- Para evitar que insectos comenzaran a colocarse sobre la materia prima secándose se colocó una manta sobre la bandeja, lo suficientemente fina para que permitiera darse el secado.
- Durante las noches y días lluviosos se guardó el material en el recipiente plástico con tapadera y colocándolo en lugares techados para evitar que estos absorbieran humedad del ambiente.
- Se realizó el secado solar durante 5 días y posteriormente se midió la humedad del material por medio de la balanza de humedad.
- Para medir la humedad de la cáscara y de la semilla se siguió el mismo procedimiento descrito para la medición de la humedad inicial de la materia prima.
- Se detuvo el secado solar una vez que la humedad de la materia prima estuviese en un rango de 25-35% de humedad y que esta no variara significativamente de un día a otro.

3. Secado en horno de bandejas

- Para el secado en el horno deshidratador de bandejas se encendió primeramente el equipo y se permitió que precalentara hasta una temperatura deseada.
- En el panel de control del equipo se encendió el switch de encendido general del horno, luego se encendieron los ventiladores de entrada y succión de aire presionando los

botones de encendido en el panel de control y finalmente se encendieron las resistencias del horno accionando los tres switches ubicados en la parte inferior del switch de encendido general del horno. Luego se colocó la temperatura deseada en el panel de control.

- Para determinar la temperatura dentro del horno además de la temperatura desplegada por el panel de control del equipo se colocó un termómetro dentro del horno. Se abrió las puertas del horno y se colocó el termómetro de modo que quedara sobre las bandejas y el display de la temperatura se colocó a un costado exterior del equipo. Luego de colocar el termómetro se cerraron las puertas del equipo.
- Una vez encendido el horno, se monitoreó la temperatura durante el precalentamiento con el termómetro colocado al costado del horno hasta que este llegase a una temperatura que oscilaba entre 65-70°C.
- Mientras precalentó el horno durante una media hora, se midió la masa de la materia prima a secar con la báscula.
- Luego de medir la masa de la materia prima se seleccionó 4 muestras de control para determinar las variaciones de humedad en función del tiempo. Las 4 muestras de control fueron para cada material, para la cáscara y la semilla, es decir, 4 controles para la cáscara y 4 controles para la semilla. Por lo que se midió la humedad inicial de dicha materia prima por medio de la balanza de humedad para determinar el contenido de agua inicial en los controles.
- Se seleccionaron 4 muestras de control con la finalidad de realizar un análisis estadístico y realizar un análisis de prueba Q si hubiese algún dato dudoso de la serie de datos medidos.
- Una vez medida la masa y precalentado el horno, se abrió las puertas del horno deshidratador y se distribuyó 5 kg de materia prima entre las bandejas del horno asegurando que estuviesen separadas y tuviesen una superficie expuesta para el secado. Además, se colocó en una bandeja metálica con malla por separado las muestras de control para llevar el control de la humedad de la materia prima secándose.
- Se colocó rápidamente la materia prima sobre las bandejas de modo que no se perdiera mucha energía al ambiente y redujera significativamente la temperatura interna del horno.
- Una vez colocada la materia prima, se cerró las puertas del horno deshidratador y se comenzó a medir el tiempo de secado tomando como el tiempo 0 desde que se introdujo la materia prima al horno y se cerraron las puertas del horno.

- Cada 30 minutos, se midió la masa de la materia prima de control con la balanza analítica y se determinó la humedad con relación a la masa inicial para observar el decaimiento de la humedad con el tiempo. Además, se anotó la temperatura dentro del horno durante las mediciones hechas.
- Con la ayuda de la bandeja plástica se trasladó las muestras de control del horno a la balanza analítica para evitar el contacto con la muestra.
- Se realizó el procedimiento anterior hasta que la humedad de la materia prima se encontrara en un rango de humedades de 25-35% de humedad.
- Una vez la materia prima alcanzó el contenido de humedad deseado, se apagó el equipo apagando inicialmente las resistencias accionando los switches del panel de control, luego se apagaron los ventiladores y finalmente se apagó el equipo en general.
- Una vez apagado el equipo se retiró de cada bandeja la materia prima seca y se almacenó en una bolsa plástica para realizar la molienda posterior de la materia prima. Por otra parte, se retiró el termómetro del horno y se cerró las puertas del horno.

D. Reducción de tamaño de la materia prima

1. Equipo y materiales requeridos

Para el proceso de reducción de tamaño se evaluó dos tipos de molinos para contar con un tamaño de partícula determinado para el proceso de pirólisis, para ello se utilizó:

- 1 molino de discos.
- 1 trituradora de residuos orgánicos o trituradora de cuchillas.
- 1 báscula Ohaus, serie 3000, con precisión de ± 0.01 kg.
- 4 bolsas plásticas.
- Aire comprimido.
- 1 balanza Mettler Toledo modelo BBA231, con capacidad de 0 a 100 kg y con una incertidumbre de ± 0.05 kg.
- 1 tamizadora ROTAP, modelo RX-29.

2. Reducción de tamaño en molino de discos

- Para la reducción de tamaño por medio del molino de discos se utilizó la cáscara de aguacate seca del proceso de secado con el horno deshidratador y del secado solar.
- Antes de iniciar la molienda se midió la masa de cáscara de aguacate seca del proceso de secado solar y secado por horno con la ayuda de la báscula.

- Se midió 340 g de cáscara secada solarmente y se midió 420 g de cáscara secada por medio del horno.
- Antes de encender el molino se colocó una bolsa plástica en la descarga del molino para recuperar todo material sólido molido, tal como se observa en la ilustración no. 8 en la sección de anexos.
- Luego de colocar la bolsa se encendió el molino de discos presionando el botón de encendido en el panel de control del mismo.
- Una vez encendido el molino se dosificó constantemente cáscara seca al molino para realizar la molienda. El material molido se recuperó en la bolsa plástica.
- El procedimiento anteriormente mencionado se realizó individualmente para cada tipo de cáscara secada, es decir para la cáscara secada solarmente y para la cáscara secada por medio del horno.
- Con la ayuda de la báscula se midió la masa del material molido recuperado.
- Una vez finalizada la molienda, se abrió el molino y por medio de aire comprimido se limpió el mismo recolectando y midiendo la masa de lo que representaría la masa de las pérdidas por acumulación de material dentro del molino.

3. Reducción de tamaño en trituradora de cuchillas

- Para la reducción de tamaño con la trituradora de residuos orgánicos o la trituradora de cuchillas se realizó la molienda de material seco, del secado solar y secado en el horno, además de moler materia prima sin secar. En la Ilustración No. 7 en la sección de anexos se observa el molino utilizado.
- Antes de realizar la molienda se midió la masa de la materia prima con la ayuda de la báscula. Se midió 4.28 kg de material seco y se midió 7.92 kg de material sin secar.
- En la descarga de la trituradora de residuos orgánicos se colocó una bolsa plástica para la recepción del material molido.
- Una vez colocada la bolsa se encendió el molino presionando el botón de encendido en el panel de control.
- Se dosificó constantemente material a moler y se recuperó el material en la bolsa plástica.
- El procedimiento anteriormente mencionado se realizó individualmente para cada tipo de material, tanto para el material sin secar como el material seco.
- Luego de recuperar la materia prima molida se midió la masa final con la ayuda de la báscula.

- Una vez finalizada la molienda, se abrió el molino y por medio de aire comprimido se limpió el mismo recolectando y moliendo la masa de lo que representaría la masa de las pérdidas por acumulación de material dentro del molino.

4. Análisis granulométrico

- Para la realización del análisis granulométrico de la materia prima molida, tanto para el molino de discos como para la trituradora de cuchillas se siguió la metodología ASTM D6913-4 de metodología estándar para la distribución de partículas de suelos utilizando un análisis con tamices. Dada la consistencia de la materia prima molida se optó por seguir dicha metodología.
- En la Ilustración No. 11 en la sección de anexos se observa el sistema de tamizaje utilizado.
- Para determinar la distribución de tamaños de partícula y determinar los porcentajes de materia que atraviesan y se quedan en una malla se utilizó un sistema de tamizaje mecánico con 7 platos con distintos mesh. Los platos utilizados corresponden a los números de mesh de 20, 28, 42, 60, 80, 100 y un plato de recolección de finos sin malla.
- En un primer paso se midió la masa del material molido con la ayuda de la balanza Mettler Toledo, siendo esta la masa total de la muestra.
- Luego de medir la masa total, se abrió la tapadera del primer plato de modo que se pudiera alimentar al sistema de tamizaje.
- Se colocó el material molido en el primer plato del sistema de tamizaje, correspondiente al plato con número de mesh 20 y se colocó la tapa para iniciar con el proceso de separación.
- Una vez colocado el material en el primer plato y colocada la tapa, se configuró la tamizadora para operar durante 20 minutos en el panel de control del equipo.
- Luego de haber configurado el tiempo de operación se presionó el botón de inicio “Start” e iniciar el proceso de tamizaje.
- Luego de transcurridos los 20 minutos, se separó cada uno de los platos y con la ayuda de la balanza se midió la masa de cada uno para realizar el análisis granulométrico.
- Se realizó el procedimiento mencionado anteriormente para el material molido obtenido tanto del molino de discos y para el material seco molido con la trituradora de cuchillas.
- Una vez finalizado el análisis con la tamizadora, se limpió cada plato recuperando la materia prima molida y limpiando cada plato con aire comprimido.

E. Pirólisis en reactor de 100 g a escala laboratorio

1. Equipo y materiales requeridos

Para el proceso de pirólisis en el reactor de 100 g a escala laboratorio se utilizó los siguientes equipos y materiales.

- 1 balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.
- 1 sistema de condensación de vidrio.
- 1 reactor de pirólisis de 100 g de lecho fijo.
- 1 horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010, con un rango de temperatura de 25 a 1200°C.
- 1 bomba de agua de pecera de 120 W.
- 1 sistema de chimenea de acero inoxidable 304 del reactor de pirólisis.
- 2 pedazos de cañuela de 15 cm de largo y 10 cm de diámetro.
- 1 espátula de metal.
- 1 beaker de 500 mL.
- 1 sistema de soporte (soporte y pinzas).
- 1 cubeta plástica con capacidad de 20 L.
- 1 beaker de 250 mL
- 2 mangueras plásticas.
- 4 frascos de vidrio.
- 50 mL de n-hexano con 96% de pureza marca Merck.
- 50 mL de acetona al 99.8% de pureza.
- 1 termómetro láser Digi-Sense, modelo 20250-05, con incertidumbre de $\pm 0.05^\circ\text{C}$.

2. Preparación de la muestra

- Para la preparación de la muestra para el proceso de pirólisis se utilizó la materia prima molida previamente en el molino de discos y la trituradora de residuos orgánicos.
- Con la ayuda de la balanza semianalítica y el beaker de 500 mL se midió la masa de la materia prima del proceso de pirólisis. Se realizó el proceso de pirólisis con una alimentación en proporción 50:50, es decir 50% de cáscara de aguacate y 50% de semilla

de aguacate, al igual que una alimentación aleatoria, es decir una mezcla de semilla y cáscara de aguacate.

- Para el proceso de pirólisis se utilizó material molido con tamaño de partícula entre 0.85 y 0.60 mm, correspondientes a los platos con número de mesh de 20 y 28 con la finalidad de reducir la cantidad de producto fino a obtener del proceso.
- En la Ilustración No. 13 en la sección de anexos se observa el reactor utilizado.
- Se abrió el reactor de pirólisis removiendo la tapa del mismo, siendo esta una brida.
- Se alimentó la cáscara y la semilla de aguacate al reactor con la ayuda de la espátula de metal y se cerró el reactor asegurando de que se colocará la unión de grafito del mismo.
- Se aseguró de no sobrecargar el reactor dado que el excedente de materia podría salirse del reactor en el agujero correspondiente a la chimenea.
- Finalmente, se taró los 4 frascos de vidrio que se utilizaron posteriormente en las corridas de pirólisis, frascos donde se almacenó producto para determinar su masa y realizar el balance de masa del proceso.
- Una vez cargado el reactor se prosiguió a realizar el montaje del sistema.

3. Montaje del sistema de pirólisis

- Para el montaje del sistema de pirólisis se utilizó el horno mufla, el cual corresponde a la fuente de energía en forma de calor para el sistema de pirólisis, y se utilizó un sistema de condensación.
- El reactor cargado con la alimentación se introdujo dentro del horno mufla.
- Posteriormente se colocó el sistema de chimenea del reactor, colocándolo a través del agujero ubicado en la parte superior de la mufla y roscando el mismo con el reactor.
- Una vez colocado el sistema de chimenea del reactor, se colocó los aislantes de cañuela en la parte superior del mismo para evitar que cualquier reflujo se solidificara y taparan el sistema de chimenea de gases.
- Por otra parte, se montó el sistema de condensación para los gases de la chimenea.
- Utilizando el soporte y las pinzas, se colocó con cuidado el condensador de vidrio.
- Posteriormente, utilizando la cubeta plástica, se llenó de agua y se sumergió la bomba de agua de pecera.
- Utilizando las mangueras plásticas, se unió la bomba de agua de pecera con el condensador de vidrio y la otra manguera que dirigía el flujo de salida del condensador de

regreso a la cubeta. Se aseguró colocar las mangueras en un arreglo en contracorriente con respecto a los gases salientes de la chimenea.

- En el extremo de salida del condensador se colocó el beaker de 250 mL para recuperar los productos condensados.
- Una vez montado el sistema de condensación, ese se unió con el extremo de salida de la chimenea para lograr la condensación de los gases de pirólisis. Tal como se observa en la Ilustración No. 12 en la sección de anexos.
- Con el sistema de pirólisis montado se prosiguió con las corridas de pirólisis.

4. Corridas de pirólisis

- Con el sistema de pirólisis montado, se inició la corrida conectando la bomba de agua de pecera a la corriente para que comenzara a circular agua de enfriamiento en el condensador.
- Con la ayuda del termómetro láser se midió la temperatura del agua de enfriamiento, siendo esta de 23°C.
- Luego de poner en marcha el sistema de condensación, se encendió el horno mufla presionando el botón de encendido ubicado en el panel de control.
- Posteriormente se colocó una temperatura inicial desde el panel de control de 115°C.
- Luego de que la mufla llegara a la temperatura indicada, se aumentó la temperatura del horno a una tasa de 15°C por cada 20 min, lo que equivale a 0.75°C/min.
- Durante el proceso de pirólisis se midió la temperatura en la chimenea a la salida de la mufla y a la entrada del condensador con la ayuda del termómetro láser.
- Durante el rango de temperatura de 115 a 145°C se recuperó el primer producto en salir del reactor, siendo este el agua. Toda el agua recuperada del proceso se colocó en el primer frasco de vidrio el cual se selló colocando un pedazo de plástico la tapa del mismo.
- Conforme avanzaba el proceso e iba aumentando la temperatura gradualmente, se recuperó producto líquido correspondiente a la fracción ligera, el cual se caracterizó por tener un color anaranjado oscuro.
- Se recolectó la fracción ligera hasta llegar a una temperatura entre 250 y 260°C, la cual se almacenó en otro frasco de vidrio el cual se selló con plástico y se colocó la tapadera.
- Finalmente, para el rango de 260°C a 350°C se recolectó la fracción pesada del producto líquido de pirólisis, el cual se caracterizó por tener un color café oscuro.

- Se realizó el proceso de pirólisis hasta que ya no se condensara producto en el condensador.
- Una vez que ya no se recuperara producto en el condensador, se apagó la mufla, se apagó la bomba de agua de pecera para detener el sistema de condensación y se recuperó el producto líquido correspondiente a la fracción pesada en otro frasco de vidrio.
- Luego de recuperar el producto líquido, se desmontó el sistema de condensación, descargando el agua de condensación de la cubeta en el drenaje y lavando con agua y acetona el condensador para remover el remanente de producto en el sistema.
- Dadas las altas temperaturas dentro de la mufla y para no dañar el material interno del horno por choque térmico, se dejó el reactor dentro de la mufla con la chimenea puesta y se descargó hasta el siguiente día una vez que la temperatura haya descendido lo suficiente para evitar cualquier tipo de daño al material de la mufla.
- Con el sistema frío primero se removió la chimenea del reactor y posteriormente se recuperó el reactor para realizar la cuantificación de los productos.

5. Recuperación y cuantificación de los productos

- Para la cuantificación de los productos, se utilizó la tara de los recipientes realizado previamente en la balanza semianalítica para determinar la masa de cada uno de los productos.
- Para los productos líquidos, siendo agua y el producto líquido de pirólisis, se midió la masa dentro del recipiente y por diferencia con respecto a la masa del recipiente se cuantificó la cantidad de producto.
- Para el producto sólido, primeramente, se abrió el reactor removiendo la tapa (la brida) del mismo.
- Luego de haber removido la tapa del reactor, con la ayuda de una espátula de metal se removió el producto sólido de pirólisis del reactor y se recolectó en el frasco de vidrio.
- Una vez recuperado todo el producto en el frasco, se midió la masa del mismo para cuantificar la cantidad de producto sólido y realizar posteriormente el balance de masa.
- El procedimiento mencionado en las secciones anteriores se realizó en quintuplicado, variando la masa entre cada corrida y de modo que se lograra tener un triplicado con una alimentación de 70 g. Además, se realizó de esta manera de modo que se pudiera realizar un análisis Q dado el caso que se tuvieran datos dudosos de la serie de datos para

determinar si se debe de aceptar o rechazar y tener aún 4 series de datos y realizar un análisis estadístico.

6. Limpieza del reactor

- Para la limpieza del reactor y de la chimenea de gases salientes del mismo se utilizó una solución de 100 mL de n-hexano con acetona en proporción 50:50.
- Se realizó el lavado interno del reactor con la solución y luego se dejó fluir la solución dentro de la chimenea para realizar la limpieza.
- La solución de limpieza con los residuos de pirólisis se recuperó en un frasco de desechos de vidrio.

F. Pirólisis semicontinuo en reactor de 7.6 kg a escala laboratorio

1. Equipo y materiales requeridos

- Sistema de pirólisis semicontinuo de 7.6 kg del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala (hogar, reactor, chimenea, condensador y tanque receptor de producto).
- 1 termocupla Autonics, modelo TCN4S Series.
- 1 báscula Ohaus, serie 3000, con precisión de ± 0.01 kg.
- 1 cilindro de gas propano de 60 lbm.
- 4 frascos de vidrio.
- 1 ventilador.
- 1 balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.
- 1 cucharón de cocina.
- 150 mL de n-hexano al 96% de pureza marca Merck.
- 150 mL de acetona al 99.8% de pureza.
- 1 termómetro láser Digi-Sense, modelo 20250-05, con incertidumbre de $\pm 0.05^\circ\text{C}$.
- 1 encendedor de plástico.

2. Preparación de la muestra

- Para la preparación de la muestra se utilizó la materia prima obtenida de la molienda por medio de la trituradora de residuos orgánicos.
- Se abrió el reactor abriendo cada tuerca plástica de mariposa y se removió con cuidado la unión de grafito del reactor.

- Con la ayuda de la báscula se taró el reactor de pirólisis de modo que se comenzara a medir la masa de materia prima dentro del mismo. Tal como se observa en la ilustración no. 16 en la sección de anexos.
- Con el cucharón de cocina se alimentó al reactor la mezcla de semilla con cáscara molida.
- Una vez medida la masa de alimentación al reactor, se cerró el mismo asegurando que la unión de grafito estuviese bien colocada y apretando adecuadamente las tuercas plásticas de mariposa.
- Finalmente, se taró los recipientes de vidrio donde se recuperaría el producto de pirólisis con la ayuda de la balanza semianalítica.
- Una vez alimentada la materia prima en el reactor se prosiguió al montaje del sistema.

3. Montaje del sistema de pirólisis

- Para el montaje del sistema de pirólisis se colocó el reactor en el hogar hecho con ladrillo y cemento refractario. Asegurando que la flama llegara al centro del reactor.
- Luego de montar el reactor en el hogar se colocó papel aluminio alrededor de la tapadera del reactor y la parte superior del hogar de modo que se minimizara las pérdidas energéticas en forma de calor con el ambiente. Sin embargo, se dejó un pequeño espacio abierto para permitir la salida de los gases de combustión.
- Una vez montado el reactor se colocó la chimenea y el condensador por medio de la unión universal de la tapadera del reactor.
- Luego de colocar la chimenea y el condensador, se montó el sistema de circulación de agua del condensador con las mangueras plásticas del condensador. Tal como se observa en la Ilustración No. 14 en la sección de anexos.
- Se colocó el arreglo del condensador de modo que fuese en contracorriente con respecto a los gases salientes del reactor y el agua de enfriamiento del condensador.
- Se conectó la manguera de agua de entrada a un grifo de agua municipal y la manguera de descarga se colocó en un drenaje.
- Luego de colocar adecuadamente las mangueras del sistema de condensación, se abrió la válvula de entrada de agua del condensador y se verificó que el sistema no tuviera ningún tipo de fuga.
- Posteriormente, se colocó el recipiente de recuperación de producto de pirólisis y se colocó la termocupla en el termopozo ubicado en la tapadera del reactor.

- Una vez colocada la termocupla en el termopozo se encendió conectándola a la corriente y verificando que comenzara a desplegar la temperatura.
- Luego de montar el sistema de condensación y de colocar el reactor en el hogar, se realizó el encendido del quemador.
- Previo a encender el quemador, se midió la masa inicial del cilindro de gas con la ayuda de la báscula, siendo esta la masa inicial previo al proceso de pirólisis.
- Para encender el quemador se abrió en un primer paso la válvula del cilindro de gas y se colocó un trapo húmedo encima de la válvula para evitar cualquier fuga de gas al ambiente.
- Posteriormente se abrió la válvula a la entrada del hogar para permitir la salida de gas propano en el quemador.
- Luego de abrir la válvula se encendió la llama con la ayuda del encendedor de plástico y se ajustó el tamaño de la llama.
- Una vez encendida la llama se colocó un ventilador a la salida del hogar para evitar que la flama llegara hasta la válvula ubicada a la entrada del hogar y evitar un accidente.
- Una vez encendida la llama en el hogar se inició la corrida de pirólisis.

4. Corridas de pirólisis

- Una vez iniciada la corrida de pirólisis, se abrió la válvula de la llama de modo que la temperatura dentro del reactor estuviese a 120°C. Permitiendo a esta temperatura que se recuperara el primer producto del proceso siendo el agua.
- Conforme disminuyó la cantidad de agua dentro del reactor, la temperatura aumentó gradualmente hasta los 140°C sin abrir ni cerrar la válvula de la llama del hogar.
- Conforme la cantidad de agua saliente disminuía se aumentó la temperatura a un rango de 150 a 160°C.
- Una vez que la tonalidad del producto líquido recuperado cambiase de un líquido incoloro y a veces amarillento a tonalidades oscuras o naranjas se recuperó el agua en el primer recipiente.
- Luego de recuperar el agua y que se comenzara a recuperar el producto líquido de la pirólisis, la temperatura aumentó gradualmente hasta 170°C.
- Cuando la cantidad de líquido recuperado del condensador comenzó a disminuir se aumentó la temperatura del reactor hasta una temperatura de 250°C, el gran aumento de

temperatura se debe a que no se logró controlar adecuadamente la llama del quemador de modo que se lograra un aumento gradual de la temperatura dentro del reactor.

- Conforme se recuperaba el remanente de la fracción ligera, la temperatura del reactor aumentó gradualmente.
- Finalmente, para recuperar la fracción pesada, se aumentó la temperatura hasta un rango de 330 a 350°C. Se mantuvo a dicha temperatura hasta completar con el proceso de pirólisis.
- A lo largo de la corrida se midió la temperatura de los gases a la salida del reactor y la temperatura del líquido obtenido con la ayuda del termómetro láser.
- Ambos productos líquidos se recuperaron en frascos de vidrio.
- Una vez finalizada la corrida de pirólisis se cerró por completo la válvula de entrada del hogar, apagando la llama del quemador y se cerró la válvula de salida del cilindro de gas.
- Luego de apagar la llama del hogar, se cerró la válvula del agua del condensador y se esperó que toda el agua saliera del mismo antes de remover la manguera de entrada del grifo y la de salida del drenaje.
- Finalmente, se apagó la termocupla y se esperó al día siguiente para descargar el reactor debido a las altas temperaturas.

5. Recuperación y cuantificación de los productos

- Una vez que la temperatura del reactor se redujera significativamente, se desmontó la chimenea y el condensador desenroscando la unión universal ubicada en la tapadera del reactor.
- Se retiró el reactor del hogar y se abrió el reactor para recuperar el producto sólido tal como se observa en la Ilustración No. 17 en la sección de anexos.
- Se colocó el producto sólido en un recipiente de vidrio con la ayuda del cucharón de cocina.
- Una vez recolectados los productos de pirólisis en los frascos de vidrio se midió la masa de cada uno con la balanza semianalítica para determinar por diferencia la cantidad de producto y realizar posteriormente el balance de masa del proceso.
- Se realizó el proceso anteriormente descrito en quintuplicado variando la cantidad de material alimentado al reactor. Se realizó dos corridas incompletas de pirólisis y tres corridas completas del proceso para contar con un análisis estadístico del proceso completo y realizar una prueba Q dado el caso de tener una serie de datos dudoso.

- Una vez descargado el reactor se prosiguió a realizar la limpieza del reactor.

6. Limpieza del reactor

- Para la limpieza del reactor se utilizó una solución de 300 mL de n-hexano con acetona al 50:50 dados los remanentes de producto sólido y líquido, primordialmente de la fracción pesada, que se encontraba aún dentro del reactor.
- Utilizando una esponja y guantes se realizó los lavados dentro del reactor para remover los residuos del proceso de pirólisis.
- La solución utilizada para la limpieza y los residuos de pirólisis se recuperaron en un frasco de vidrio de desechos orgánicos.

G. Análisis cinético de los reactores de pirólisis

1. Equipo y materiales requeridos

Para el análisis cinético de los reactores de pirólisis utilizados se utilizó los siguientes equipos y materiales:

- 1 balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.
- 1 sistema de condensación de vidrio.
- 1 reactor de pirólisis de 100 g de lecho fijo.
- 1 horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010, con un rango de temperatura de 25 a 1200°C.
- 1 bomba de agua de pecera de 120 W.
- 1 sistema de chimenea de acero inoxidable 304 del reactor de pirólisis.
- 2 pedazos de cañuela de 15 cm de largo y 10 cm de diámetro.
- 1 espátula de metal.
- Sistema de pirólisis semicontinuo de 7.6 kg del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala (hogar, reactor, chimenea, condensador y tanque receptor de producto).
- 1 termocupla Autonics, modelo TCN4S Series.
- 1 báscula Ohaus, serie 3000, con precisión de ± 0.01 kg.
- 1 cilindro de gas propano de 60 lbm.
- 1 termómetro láser Digi-Sense, modelo 20250-05, con incertidumbre de ± 0.05 °C.
- 1 encendedor de plástico.

- 1 cucharón de cocina.
- 1 ventilador.
- 2 beakers de 500 mL.
- 2 beakers de 250 mL.
- 1 sistema de soporte (soporte y pinzas).
- 1 cubeta plástica con capacidad de 20 L.
- 2 mangueras plásticas.
- 7 frascos de vidrio.
- 200 mL de n-hexano al 96% de pureza marca Merck.
- 200 mL de acetona al 99.8% de pureza.

2. Preparación de la muestra

- La preparación de la muestra para ambos reactores, de 100 g y de 7.6 kg, se realizó como se detalló previamente en las secciones anteriores para la alimentación de la cáscara y la semilla de aguacate.

3. Montaje de los sistemas de pirólisis

- El montaje de ambos reactores de pirólisis, de 100 g y de 7.6 kg, se realizó como se detalló previamente en las secciones anteriores.

4. Corridas de pirólisis y recuperación de datos

- Si siguió el procedimiento descrito anteriormente para las corridas de pirólisis para ambos reactores, tanto para el de 100 g como el de 7.6 kg, en lo que viene siendo el control de la temperatura del sistema.
- Se colocó el beaker de 500 mL en la salida del condensador del reactor de 7.6 kg y el beaker de 250 mL en la salida del condensador del reactor de 100 g.
- Desde el arranque de ambos reactores se midió el tiempo y cada 5 minutos se anotó el valor de la temperatura de la mufla, en el caso del reactor de 100 g, y el valor de la temperatura de la termocupla, en el caso del reactor de 7.6 kg.
- Además de la temperatura, se midió la masa recuperada en los beakers colocados a la salida de los condensadores con la ayuda de la balanza semianalítica.
- Durante el arranque de los reactores solo se anotó los valores de temperatura dado que no había aún un flujo de producto de salida.

- Se realizó el procedimiento descrito anteriormente, de realizar las mediciones de masa cada 5 minutos hasta completar el proceso de pirólisis.
- Se midió la masa de agua y de producto líquido de pirólisis.
- Una vez completado el proceso de pirólisis para ambos reactores se apagaron y se desmontó los sistemas como se describió anteriormente.

5. Recuperación y cuantificación de los productos

- Luego de esperar al día siguiente para desmontar los reactores, se recuperó el producto sólido, con la espátula de metal en el caso del reactor de 100 g y con el cucharón de cocina en el caso del reactor de 7.6 kg.
- Con la ayuda de la balanza semianalítica se midió la masa del producto sólido en el frasco de vidrio y por medio de la diferencia con la tara se cuantificó la cantidad de producto sólido.
- Dado que se realizó la medición de masa cada 5 minutos de los productos líquidos ya se contaba con la cantidad de producto de cada uno.
- Una vez cuantificada la cantidad de producto se prosiguió con la limpieza del reactor.

6. Limpieza del reactor

- Se realizó la limpieza de los reactores como se describió previamente utilizando las soluciones de n-hexano y acetona.

7. Análisis de datos en Berkeley Madonna

- Los datos se analizaron en el software Berkeley Madonna para obtener los modelos cinéticos de ambos reactores.
- Inicialmente en una hoja de cálculo en el software Excel se determinó por medio de la relación del cambio de masa global del producto líquido con el producto gaseoso como varió la masa de producto gaseoso dentro del reactor.
- Con el cambio de masa de producto gaseoso se predijo la formación de producto gaseoso instantáneo para después determinar por balance de masa la variación de masa dentro del reactor y por ende la masa de material sólido instantánea dentro del reactor.
- Una vez que se obtuvo los datos de masa de sólido instantánea dentro del reactor se exportó a un documento de Berkeley Madonna los datos de temperatura en función del tiempo y de masa dentro del reactor en función del tiempo.

- En el caso del reactor de 100 g, se realizó en un primer punto el análisis de los datos de temperatura en función del tiempo para utilizarlo posteriormente en el modelo cinético de la masa en función del tiempo.
- Para la temperatura se realizó un análisis a partir de la ecuación modificada de Boltzmann para hornos mufla:

Ecuación No. 2 Ecuación de Boltzmann de temperatura en función del tiempo para hornos mufla

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1 + e^{\frac{t - t_1}{m}}}$$

Donde:

T= Temperatura del sistema en °C.

T1= Temperatura en el momento 1 en °C.

T2= Temperatura en el momento 2 en °C.

t_e y m= constantes

t= Tiempo en min.

(Anleu, y otros, 2019)

- Se ajustó la ecuación a los datos experimentales obtenidos de la temperatura en función del tiempo.
- Una vez ajustada la temperatura, se realizó el análisis de la masa en función del tiempo siguiendo el siguiente modelo:

Ecuación No. 3 Ecuación de la masa en función del tiempo para el reactor de pirólisis

$$r_W = k * (W - W_f)^n$$

$$k = A * e^{\frac{-E_a}{R*T}}$$

Donde:

r_w= velocidad de cambio de masa del reactor en función del tiempo.

k= constante de Arrhenius.

W= masa instantánea dentro del reactor.

W_f= masa final de producto sólido dentro del reactor.

n= orden de reacción.

A= constante de frecuencia.

E_a= energía de activación en kJ/kmol.

T= temperatura en K (obtenida con la ecuación modificada de Boltzmann para hornos mufla).

R= constante de los gases ideales (8.314 kJ/kmol*K).

(Anleu, y otros, 2019)

- Finalmente, se ajustó el modelo a los datos experimentales, determinando de esa manera los parámetros cinéticos correspondientes para la pirólisis de aguacate en el reactor de 100 g.
- Para el reactor de 7.6 kg se realizó un proceso similar, pero con la diferencia de que se determinó la ecuación de temperatura a partir de una variación de la ecuación de temperatura de la mufla tomando en cuenta las rampas de temperatura.
- Finalmente, se ajustó los datos obtenidos con el modelo de la velocidad de cambio de masa del reactor en función del tiempo y se determinó los parámetros cinéticos.

H. Análisis fisicoquímicos de los productos de pirólisis

1. Equipo y materiales requeridos

Para los análisis fisicoquímicos de los productos sólido y líquido de pirólisis se utilizó los siguientes equipos y materiales:

- 1 espectrofotómetro IR marca Perkin Elmer modelo Frontier.
- 1 mortero de porcelana.
- 3 tabletas de reactivo de Kjeldahl de 5 g/tableta marca Merck (libre de mercurio y selenio).
- 1 balanza analítica Mettler Toledo, modelo ME204, con un rango de capacidad de 0 a 220 g y una incertidumbre de ± 0.0001 g.
- 36 mL de ácido sulfúrico para análisis al 95-97% de pureza marca Merck.
- 1 digestor marca Büchi, modelo K-425.
- 1 unidad de destilación marca Büchi, modelo K-350.
- 25 mL de solución de ácido clorhídrico 0.125 N marca Merck.
- 1 bureta KIMAX de 50 mL con incertidumbre de ± 0.05 mL.
- Solución de hidróxido de sodio al 40% (V/V).
- 6 erlenmeyers de 200 mL.
- 1 calorímetro IKA modelo C200, con rango de medición de 0 a 40000 J con presión de operación de oxígeno de 30 bar.
- 1 cilindro de oxígeno al 99.5% de pureza marca Productos Del Aire.
- 1 pipeta graduada de 10 mL.

- 1 balanza analítica Ohaus, Pioneer Series, modelo PA114, con un rango de medición de 0 a 110 g y una incertidumbre de ± 0.0001 g.
- 4 pastillas de ácido benzoico marca IKA C 723 de 0.5 g.
- 1 pichel de agua plástico.
- 1 balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.
- 1 probeta marca KIMAX con capacidad de 50 mL.
- 4 crisoles de porcelana.
- 1 pinza de laboratorio para crisoles.
- 1 desecadora
- 1 horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010, con un rango de temperatura de 25 a 1200°C.
- 1 plancha de asbesto.
- 1 horno de cocina Indurama, modelo Oveido, con un rango de temperatura de 105 a 270°C.
- 1 cromatógrafo de gases marca Agilent modelo 6850 con columnas HP-5 y DB-Wax.
- 10 mL de cloroformo (triclorometano) para análisis con pureza de 99.0-99.4% marca Merck.
- 1 beaker de 100 mL.
- 3 beakers de 500 mL.
- 1 bomba al vacío.
- 1 kitasato de 500 mL.
- 1 embudo büchner.
- 3 papeles filtro.
- 5 viales para análisis cromatográfico.
- 2 jeringas plásticas con microfiltro.
- 1 balanza analítica Ohaus, Analytical Plus, con precisión de 0.00001 g.
- 1 viscosímetro Brookfield, DV-E series, modelo RVDV-E y spindle 61.
- 1 cuarto frío
- 1 termómetro láser Digi-Sense, modelo 20250-05, con incertidumbre de $\pm 0.05^\circ\text{C}$.
- 1 beaker de 1 L.

2. Producto Sólido

a. Análisis IR

- Se realizó el análisis IR de la materia prima y del producto sólido de pirólisis, tanto para la corrida de pirólisis incompleta como la corrida de pirólisis completa.
- Para la materia prima se tomo una muestra de cáscara y semilla molida y se homogenizó con la ayuda de un mortero de porcelana.
- Luego de homogenizar la muestra se colocó sobre el detector del espectrofotómetro IR para obtener el espectro IR correspondiente de la materia prima.
- Para el producto sólido de pirólisis incompleta y pirólisis completa se colocó una muestra sobre el detector del equipo y se obtuvo los espectros IR.
- A partir de los picos obtenidos del espectro IR se determinó los grupos funcionales presentes en las muestras analizadas.

b. Determinación del contenido de nitrógeno (Método Kjeldahl)

- Para la determinación del contenido de nitrógeno se basó en la metodología ASTM E 258-67 para cuantificación de nitrógeno total en materiales orgánicos a través del método modificado de Kjeldahl.
- Para el análisis de Kjeldahl del producto sólido de pirólisis se molió en un primer paso la materia prima con la ayuda de un mortero de porcelana de modo que estuviese lo más homogénea posible. Se molió 5 g de muestra en el mortero.
- Luego de moler el producto sólido en el mortero, se midió 0.25 g de muestra sobre papel encerado en una balanza analítica. Una vez medida la masa se envolvió la muestra en el papel encerado. Se realizó este paso 6 veces debido a que el sistema de digestión contaba con 6 tubos para el análisis.
- Luego de colocar las muestras en los tubos del digestor, se colocó 2.5 g de reactivo de Kjeldahl en cada uno de los mismos.
- Luego de añadir el reactivo de Kjeldahl, se añadió 6 mL de ácido sulfúrico puro en cada tubo de Kjeldahl con el dispensador en el frasco del ácido sulfúrico.
- Una vez colocados los tubos en el digestor, se colocó el brazo en la parte superior del equipo y se conectó con el scrubber el equipo para lavar los gases de digestión ácida. Tal como se observa en la ilustración no. 22 en la sección de anexos.
- Se dejó el sistema de digestión por 2 horas.

- Luego de esperar 2 horas se apagó el scrubber, se apagó el sistema de digestión y se permitió que los tubos redujeran su temperatura para su manipulación.
- Una vez que la temperatura de los tubos se redujo significativamente, se trasladó individualmente con cuidado cada tubo al sistema de destilación, donde se utilizó una solución de hidróxido de sodio al 40% (V/V) para realizar la destilación.
- Para la destilación se colocó un Erlenmeyer con 5 mL solución indicadora de rojo de metilo, donde se recolectó la solución neutralizada y destilada. Tal como se observa en la Ilustración No. 23 en la sección de anexos.
- Luego de realizar la destilación y neutralizar la solución con hidróxido de sodio, se descartó la solución de los tubos donde se realizó la digestión.
- En el Erlenmeyer donde se realizó la neutralización se realizó una titulación con ácido clorhídrico 0.125 N hasta observar un cambio a un color rosado tenue. Con el volumen obtenido se realizó posteriormente los cálculos para determinar el porcentaje de nitrógeno.
- Se realizó este mismo procedimiento para los demás tubos de digestión, siendo 6 en total.

c. Poder calorífico

- Para el análisis de poder calorífico de la muestra de producto sólido de pirólisis se basó en la metodología ASTM D5865-10a.
- Previo a la medición de poder calorífico de la muestra, se realizó la calibración del equipo a partir de ácido benzoico.
- En un primer paso se encendió el equipo y se abrió el recipiente de disgregación, que es donde se da la combustión dentro de la bomba calorimétrica.
- Para la calibración con ácido benzoico se midió inicialmente la masa de la pastilla de ácido benzoico y se colocó en el crisol de cuarzo del equipo.
- Posteriormente se colocó el crisol sobre el soporte dentro del recipiente de disgregación y con la ayuda de tiras de lana se aseguró que este tocara tanto el alambre de ignición como la muestra.
- Dentro del recipiente de disgregación se añadió 5 mL de agua destilada con la ayuda de la pipeta graduada.
- Con el agua destilada y el crisol con la muestra se armó el sistema de disgregación. Se verificó que la tapa del mismo estuviese adecuadamente colocado.

- Posteriormente con la ayuda de la estación de oxígeno del equipo se añadió oxígeno puro al recipiente de disgregación hasta llegar a una presión de 15 bar.
- Luego de añadir el oxígeno se colocó el recipiente de disgregación dentro de la bomba calorimétrica y se cerró la tapa del mismo para iniciar la calibración.
- Luego de cerrar la tapa, con la ayuda de un pichel se llenó de agua purificada la chaqueta, colocando el agua en el tubo de llenado ubicado en costado izquierdo del equipo.
- Luego de llenar con agua y con el recipiente de disgregación dentro del equipo, se colocó en el panel de control del equipo que la corrida realizada era una calibración, se introdujo la masa de la pastilla de ácido benzoico y se inició la calibración.
- Al iniciar la calibración, el equipo automáticamente llenó la bomba con agua y luego de aproximadamente 10 minutos se proporcionaba el valor de la calibración.
- Luego de la corrida de calibración se vació la chaqueta, se retiró el recipiente de disgregación del equipo y se liberó los gases de combustión en una campana de extracción.
- Luego de liberar los gases de combustión, se abrió el recipiente de disgregación con cuidado para evitar el daño de los electrodos o del crisol y finalmente se realizó una limpieza del mismo.
- Para el análisis de las muestras se siguió el mismo procedimiento de preparación de la muestra y montaje del equipo con la diferencia de que al momento de iniciar la corrida no se colocó como una calibración y se indicó la masa de la muestra de producto sólido de pirólisis.
- Se anotó los valores correspondientes del poder calorífico obtenido y la descarga y limpieza del mismo se realizó de igual manera tal como se describió con el ácido benzoico.
- Se realizó el procedimiento en cuadruplicado y se realizó un análisis estadístico de los datos. Además, se realizó un cuadruplicado para realizar una prueba Q dado que algún dato de la serie de datos fuese dudoso y se tuviera que aceptar o rechazar en base a la prueba.

d. Densidad de bulto

- Para la medición de densidades de bulto se siguió un procedimiento similar a la medición de densidades de bulto de la materia prima molida.

- Con la ayuda de una probeta de 50 mL y una balanza semianalítica se taró inicialmente la masa de la probeta.
- Posteriormente se colocó el producto sólido dentro de la probeta hasta llegar a una marca de volumen determinada, midiendo la masa del sólido ocupando el volumen determinado.
- En el caso de la densidad de bulto aireada se colocó el material permitiendo la mayor porosidad posible entre las partículas sólidas. Se relacionó el valor de la masa de sólidos apilados con el volumen ocupado.
- En el caso de la densidad de bulto compacta, se redujo la porosidad entre partículas sólidas y se relacionó para la misma masa de sólidos apilados el nuevo volumen que ocupaba.
- Se realizó este procedimiento en cuadruplicado y se realizó un análisis estadístico de los resultados. Además, se realizó un cuadruplicado para realizar una prueba Q dado que algún dato de la serie de datos fuese dudoso y se tuviera que aceptar o rechazar en base a la prueba.

e. Humedad

- Para determinar la humedad del producto sólido se siguió la metodología ASTM E871-82 de determinación de contenido de humedad en combustibles a base de partículas de madera.
- Se utilizó 4 crisoles de porcelana, cada una con su respectiva tapa.
- En un primer paso, se midió la masa inicial de cada crisol utilizando la balanza analítica. Para la manipulación de los crisoles se utilizó una plancha de asbesto y pinzas para crisol.
- Con la ayuda del horno mufla, se llevó inicialmente los crisoles a peso constante, colocando los crisoles en el horno durante 30 minutos a 400°C, teniendo cuidado de que se encuentre entreabierto.
- Luego de los 30 minutos, se trasladó a una desecadora y se esperó 15 minutos para que la temperatura de los crisoles se redujera a temperatura ambiente.
- Luego de los 15 minutos se midió la masa de los crisoles en la balanza analítica y se colocaron nuevamente en la mufla durante 30 minutos a 400°C de la misma manera que la descrita previamente. Tal como se observa en la ilustración no. 19 en la sección de anexos.
- Luego de los 30 minutos se colocó nuevamente los crisoles en la desecadora por 15 minutos para que estos se enfriaran.

- Luego de los 15 minutos se midió la masa de los crisoles verificando que la masa de los mismos no difiriera por más de 0.0003 g. De este modo se obtuvo los crisoles con peso constante.
- Una vez se tuviera el crisol con peso constante, se tomó una muestra de aproximadamente 5.0 g de producto sólido y se colocó en cada crisol respectivamente.
- Se colocó los crisoles con muestra en un horno de cocina previamente precalentado a una temperatura de 105°C.
- Se dejó los crisoles con muestra dentro del horno durante 16 horas y se midió la masa del crisol con la muestra luego del proceso de secado en el horno.
- Utilizando la masa del crisol a peso constante, la masa inicial del crisol con la muestra y la masa final del crisol con la muestra se determinó el porcentaje de humedad en cada crisol.

f. Cenizas

- Para determinar el contenido de cenizas del producto sólido se siguió la metodología ASTM D3174-04 para el análisis de cenizas en muestras de carbón y coque.
- Se utilizó los crisoles con muestra del análisis de humedad.
- Los crisoles se colocaron en un horno mufla a una temperatura inicial de 200°C, luego se fue aumentando gradualmente la temperatura hasta llegar a una temperatura de 450°C dejando los crisoles por una hora.
- Luego de dejar los crisoles por una hora se aumentó gradualmente la temperatura hasta 700°C y se dejaron los crisoles por dos horas.
- Luego de las dos horas se redujo la temperatura a 600°C para que al momento de recuperar los crisoles no hubiera un daño del material interno de la mufla por choque térmico.
- Se colocaron los crisoles en la desecadora por 20 minutos permitiendo que estos llegaran a temperatura ambiente.
- Luego de esperar a que los crisoles se enfriaran se midió la masa final de los crisoles con ceniza con la balanza analítica, de modo que se pudiera calcular el porcentaje de cenizas de la muestra. Tal como se observa en la ilustración no. 21 en la sección de anexos.
- Se realizó el procedimiento descrito anteriormente para los cuatro crisoles para realizar posteriormente un análisis estadístico.

g. Material volátil

- Para determinar el contenido de material volátil en el producto sólido de pirólisis se siguió la metodología ASTM D3175-02 para el análisis de material volátil en muestras de carbón y coque.
- Dado que en el análisis de cenizas se calcinó el carbón, se retiró las cenizas con las pinzas de crisol evitando contacto con el crisol y se llevó nuevamente a peso constante colocándolos en un horno mufla a 400°C durante 30 minutos.
- Luego de llevar los crisoles a peso constante se colocó aproximadamente 5.0 g de muestra de producto sólido de pirólisis en cada crisol.
- Una vez se colocó la muestra en los crisoles, estos se colocaron en el horno mufla y se calentó a una temperatura de 600°C dejándolos a esa temperatura durante una hora.
- Luego de transcurrido el tiempo se colocó cada crisol en la desecadora y se esperó durante 15 minutos a que estos llegaran a una temperatura ambiente.
- Finalmente, se midió la masa de los crisoles con la ayuda de la balanza analítica para determinar el contenido de material volátil del producto sólido de pirólisis.
- Se realizó el mismo procedimiento para cada crisol y se realizó un análisis estadístico de los resultados.

3. Producto líquido

a. Análisis cromatográfico de gases acoplado con masas

- Para el análisis cromatográfico del producto líquido, se analizó por separado la fracción ligera de la fracción pesada.
- Para la fracción ligera se realizó una filtración utilizando telas para recuperar inicialmente la fracción pesada y tomar unas muestras de la misma.
- Luego de la filtración con telas se realizó una filtración al vacío para terminar la filtración de la fracción ligera y finalmente se introdujeron en viales con la ayuda de jeringas de plástico y microfiltros.
- Para la fracción pesada, se midió la masa inicial de producto y se diluyó en 10 mL de cloroformo (haciendo una dilución de 0.25 g de muestra en 5 mL de cloroformo).
- Luego de diluir el producto de la fracción pesada se introdujo en viales con la ayuda de jeringas de plástico y microfiltros.

- Una vez se tuvo las muestras en viales, separando las muestras de la fracción ligera de la fracción pesada se corrieron el cromatógrafo de gases.
- Para la fracción ligera se utilizó una columna HP5 calentando a 60°C durante 2 minutos, luego calentando a una tasa de 3°C/min hasta 250°C por 5 minutos utilizando un flujo de 1 mL/min.
- Para la fracción pesada se utilizó una columna DB-Wax bajo las mismas condiciones de operaciones que con la columna HP5.
- Posteriormente se analizó los cromatogramas obtenidos para ambas fracciones con el cromatograma y el informe proporcionado por el equipo.
- Por otra parte, para la fracción pesada se realizó un análisis de los compuestos obtenidos en el informe, depurando ciertos compuestos y comparando con la base de datos del software ChemStation y con datos de la literatura para seleccionar compuestos que sean más acordes al proceso y la materia prima utilizada.
- Finalmente, para la fracción pesada se realizó un análisis del porcentaje de abundancia de cada compuesto sin tomar en cuenta el solvente para determinar la fracción de cada uno en la muestra.
- Se realizó el análisis de la fracción ligera en triplicado y el análisis de la fracción pesada en duplicado.

b. Poder calorífico

- Para el análisis de poder calorífico se siguió la misma metodología descrita en para la determinación de poder calorífico del producto sólido con la diferencia de que la muestra de producto sólido se colocó en conjunto con un pedazo de pastilla de ácido benzoico.
- Se partió a la mitad una pastilla de ácido benzoico, colocando la mitad en el crisol, midiendo su masa y posteriormente añadiendo gotas del producto líquido.
- Luego de añadir las gotas de producto líquido se midió nuevamente la masa y se siguió el mismo procedimiento de montaje del sistema y corrida del calorímetro descrito para el producto sólido.
- Se anotó el valor obtenido del poder calorífico y por medio de una relación de fracciones másicas y con el valor teórico del poder calorífico del ácido benzoico se determinó el poder calorífico del producto líquido.

- Se realizó el procedimiento anteriormente descrito en triplicado tanto para la fracción ligera como para la fracción pesada y se realizó un análisis estadístico del poder calorífico de cada fracción.

c. Viscosidad

- Para determinar la viscosidad del producto líquido se utilizó un viscosímetro Brookfield, utilizando el spindle 61.
- Se colocó el producto líquido en el cuarto de frío del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, almacenándolo a 3°C y se dejó por 30 minutos.
- Luego de los 30 minutos, se recolectó la muestra en un beaker de 1 L asegurando que la muestra se sumergiera hasta la marca del spindle.
- Se midió la temperatura inicial del producto líquido con la ayuda del termómetro láser.
- Una vez medida la temperatura se sumergió el spindle en el producto líquido y se configuró a 100 rpm. Tal como se observa en la ilustración no. 24 en la sección de anexos.
- Luego de configurar el viscosímetro se encendió el equipo y se anotó el valor desplegado por el equipo de la viscosidad.
- Se realizó la medición de la viscosidad a distintas temperaturas, midiendo la temperatura con el termómetro láser en intervalos de 5 minutos de modo que se obtuvieran distintos valores de la viscosidad en función de la temperatura.

d. Densidad

- Para medir la densidad del producto se utilizó la balanza semianalítica y una probeta para relacionar el volumen ocupado por una masa determinada.
- Se colocó la muestra de producto líquido en una probeta de 50 mL hasta un volumen determinado, se midió la temperatura con la ayuda de un termómetro láser para tener el valor de la densidad a una temperatura determinada.
- Se realizó el procedimiento en cuadruplicado y se realizó un análisis estadístico de los datos. Se utilizó los distintos productos de pirólisis obtenidos en las distintas corridas. Además, se realizó un cuadruplicado para realizar una prueba Q dado que algún dato de la serie de datos fuese dudoso y se tuviera que aceptar o rechazar según la prueba.

VII. RESULTADOS

Cuadro No. 1 Caracterización de los residuos de aguacate

Materia	Densidad de bulto aireada (kg/m ³)	Densidad de bulto compacta (kg/m ³)	Densidad de bulto de trabajo (kg/m ³)	Diámetro de partícula (cm)	Masa individual de partícula (g)	Porcentaje de humedad (%) (g/g)
Cáscara	153.418 ± 0.415	202.575 ± 0.547	165.675 ± 0.633	3.53 ± 0.00025	14.04 ± 0.032	77.01 ± 0.25
Semilla				8.05 ± 0.00025	25.85 ± 0.032	47.25 ± 0.25

- La caracterización de la materia prima se realizó según lo descrito en la sección de metodología. Los datos que se muestran corresponden a datos promedio, correspondientes a los cuadros 46 a 52 en la sección de datos calculados. Las densidades de bulto corresponden a la mezcla de cáscara con semilla de aguacate.

Cuadro No. 2 Comparación de tipos y tiempos de secado de la materia prima

Tipo de secado	Tiempo de secado	Material	Porcentaje de humedad inicial (%) (g/g)	Porcentaje de humedad final (%) (g/g)
Solar	5 días	Cáscara	77.01 ± 0.25	32.49 ± 0.25
		Semilla	47.25 ± 0.25	41.11 ± 0.25
Secado en horno deshidratador	60 min	Cáscara	77.62 ± 0.25	34.26 ± 0.06
		Semilla	49.65 ± 0.25	31.30 ± 0.03

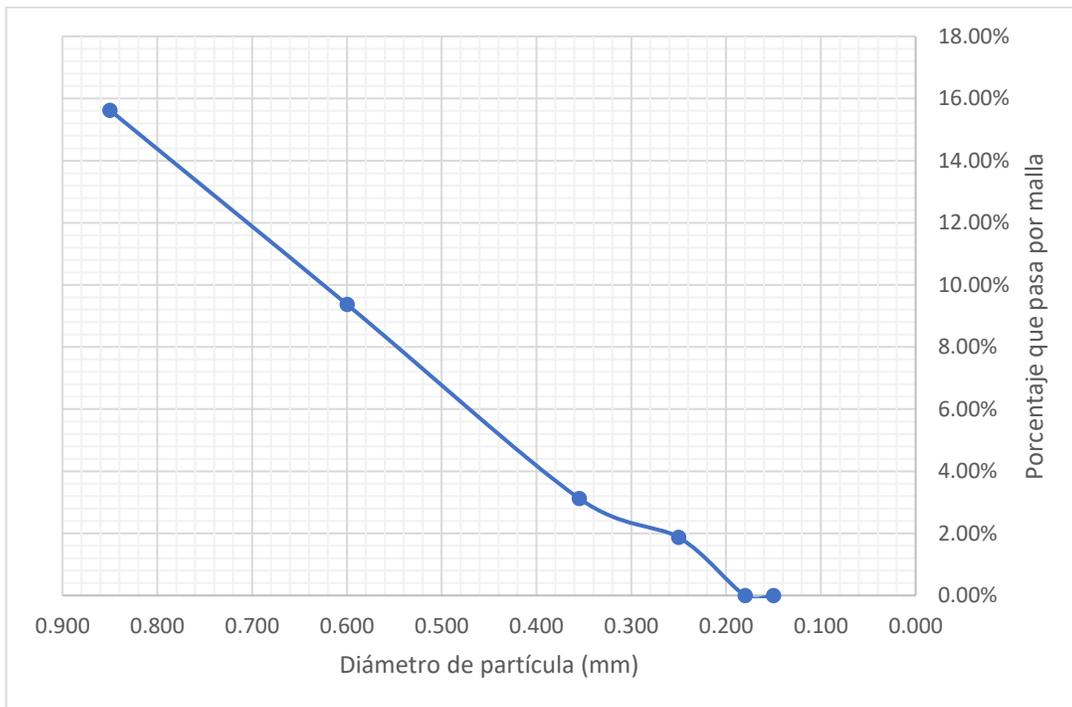
- Las mediciones de humedad en ambos métodos se describieron en la sección de metodología. Los porcentajes de humedad mostrados para ambos tipos de secado se encuentran en base húmeda. Las humedades mostradas corresponden a datos promedio, los datos correspondientes se encuentran en los cuadros 53 a 55 en la sección de datos calculados.

Cuadro No. 3 Eficacia de los equipos de molienda utilizados para la molienda de la materia prima

Equipo de molienda	Eficacia del molino (%)
Discos	94.12 ± 4.04
Cuchillas (Materia prima sin secar)	92.42 ± 0.17
Cuchillas (Materia prima seca)	96.03 ± 0.32

- La obtención de la eficacia del molino se describió en la sección de metodología. Los datos utilizados para la determinación de la eficacia de los molinos se encuentran en el cuadro 56 en la sección de datos calculados.

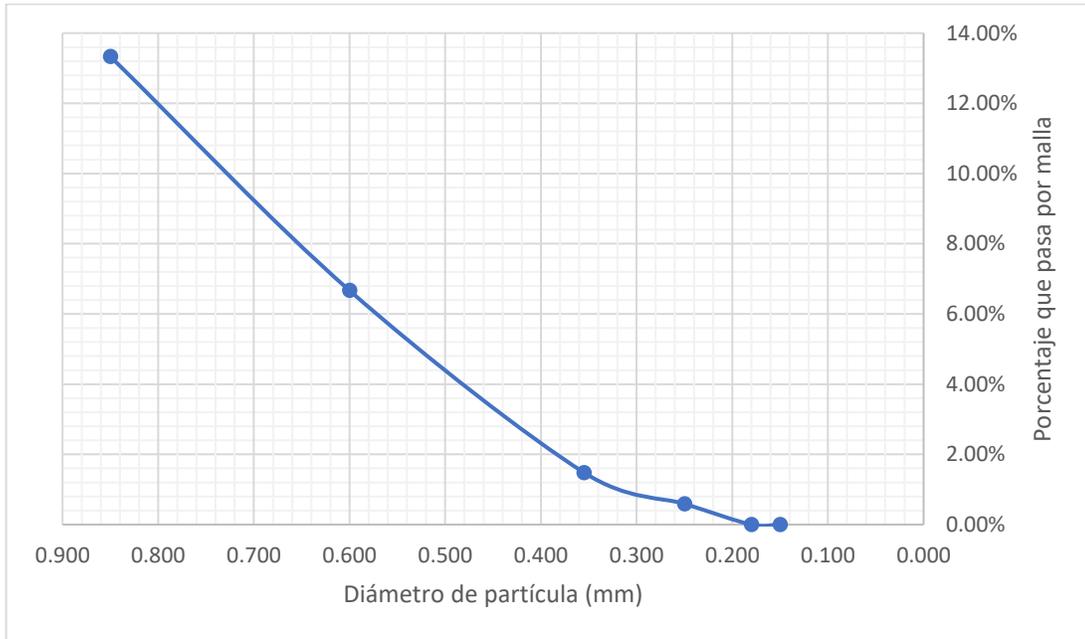
Figura No. 9 Análisis granulométrico del molino de discos



(Fuente: propia)

- Se muestra el gráfico de análisis granulométrico de la molienda de la cáscara de aguacate para el molino de discos. Se realizó el gráfico por medio del software Excel, se observa en el eje Y el porcentaje que atraviesa la malla y en el eje X el diámetro de partícula correspondiente a la malla Mesh. Se utilizó las mallas Mesh de 20, 28, 42, 60, 80 y 100. Los datos correspondientes se encuentran en el cuadro 57 en la sección de datos calculados.

Figura No. 10 Análisis granulométrico del trituradora de cuchillas



(Fuente: propia)

- Se muestra el gráfico de análisis granulométrico de la molienda de la cáscara de aguacate para el molino de discos. Se realizó el gráfico por medio del software Excel, se observa en el eje Y el porcentaje que atraviesa la malla y en el eje X el diámetro de partícula correspondiente a la malla Mesh. Se utilizó las mallas Mesh de 20, 28, 42, 60, 80 y 100. Los datos correspondientes se encuentran en el cuadro 58 en la sección de datos calculados.

Cuadro No. 4 Rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g en base húmeda para una alimentación de 50:50 (Cáscara:Semilla) y una alimentación en proporción aleatoria

Producto	Rendimiento promedio para alimentación 50:50 (%)	Rendimiento promedio para alimentación aleatoria (%)
Sólido	22.78 ± 0.080	14.71 ± 0.08
Líquido	20.37 ± 0.079	46.00 ± 0.09
Agua	35.77 ± 0.083	30.14 ± 0.09
Gas	21.08 ± 0.157	9.14 ± 0.17
Conversión	77.22 ± 0.167	85.29 ± 0.24

- Se obtuvo los datos de rendimiento para el reactor de 100 g a partir de los datos en los cuadros 63 a 65, 69 y 70 en la sección de datos calculados.

Cuadro No. 5 Rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g para una alimentación de 50:50 (Cáscara:Semilla) y una alimentación en proporción aleatoria

Producto	Rendimiento promedio para alimentación 50:50 (%)	Rendimiento promedio para alimentación aleatoria (%)
Sólido	35.46 ± 0.22	21.08 ± 0.12
Líquido	31.72 ± 0.22	65.79 ± 0.14
Gas	32.82 ± 0.30	13.12 ± 0.24
Conversión	64.54 ± 0.58	78.92 ± 0.13

- Se obtuvo los rendimientos para el reactor de 100 g en base seca a partir de los datos en los cuadros 66, 67 y 71 en la sección de datos calculados.

Cuadro No. 6 Rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 7.6 kg para una alimentación en proporción aleatoria

Producto	Rendimiento promedio (%)
Sólido	14.33 ± 0.15
Líquido	60.60 ± 0.25
Agua	17.21 ± 0.17
Gas	7.86 ± 0.39
Conversión	81.04 ± 0.49

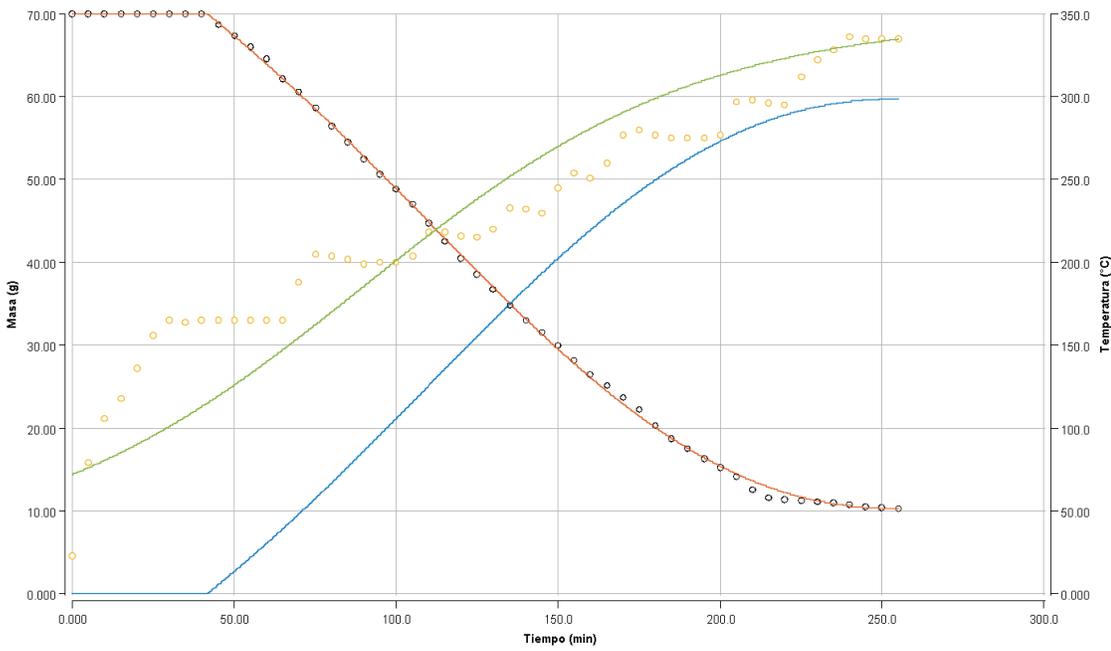
- Se obtuvo los rendimientos para el reactor de 7.6 kg a partir de los datos en los cuadros 73 a 75 en la sección de datos calculados.

Cuadro No. 7 Rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 7.6 kg para una alimentación aleatoria

Producto	Rendimiento promedio (%)
Sólido	17.28 ± 0.31
Líquido	73.28 ± 0.53
Gas	9.44 ± 0.57
Conversión	82.72 ± 0.84

- Se obtuvo los rendimientos para el reactor de 7.6 kg en base seca a partir de los datos en los cuadros 76 y 77 en la sección de datos calculados.

Figura No. 11 Predicción de la masa en función del tiempo para el reactor de 100 g

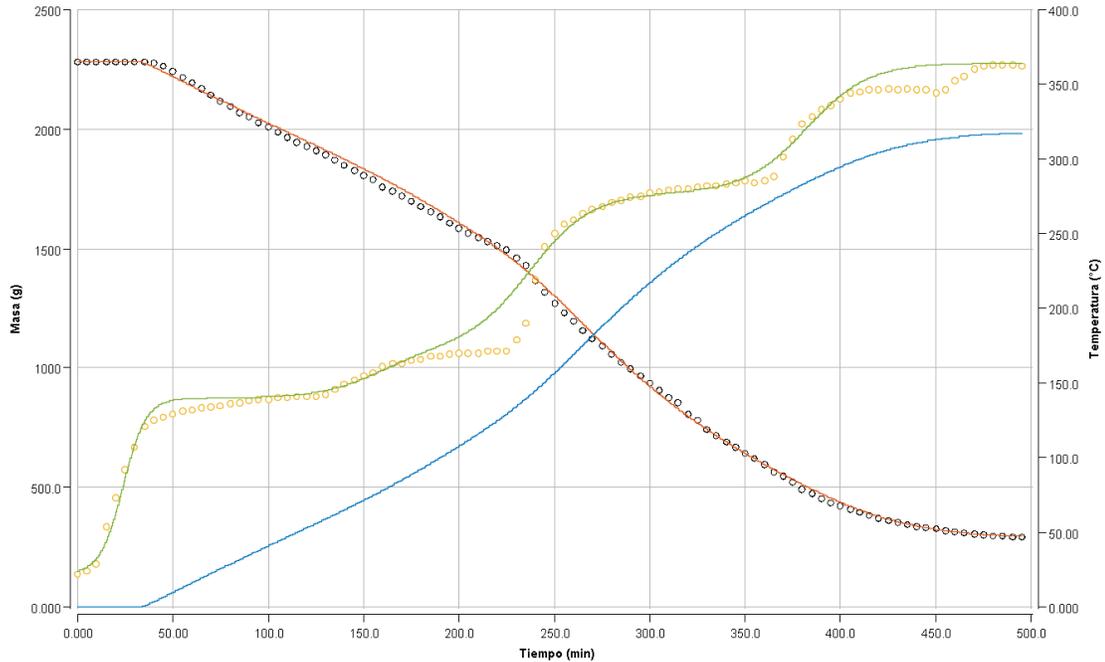


(Fuente: propia)

- Se realizó la siguiente gráfica en el software Berkeley Madonna, se muestra en el eje X el tiempo en minutos, en el eje Y izquierdo la masa en g y en el eje Y derecho la temperatura en °C. La curva anaranjada corresponde a la ecuación ajustada de la masa dentro del reactor en función del tiempo, la curva azul corresponde a la masa de producto en función del tiempo y la curva verde corresponde a la temperatura en función del tiempo. Las nubes de puntos negros corresponden a los datos experimentales de la masa dentro del reactor y las nubes de puntos amarillos corresponde a la temperatura medida en

la mufla en función del tiempo. Se utilizó las ecuaciones 29 y 31 en la sección de ecuaciones para la temperatura y la masa dentro del reactor y los datos del cuadro 31 de la sección de datos originales y el cuadro 78 en la sección de datos calculados.

Figura No. 12 Predicción de la masa en función del tiempo para el reactor de 7.6 kg.



(Fuente: propia)

- Se realizó la siguiente gráfica en el software Berkeley Madonna, se muestra en el eje X el tiempo en minutos, en el eje Y izquierdo la masa en g y en el eje Y derecho la temperatura en °C. La curva anaranjada corresponde a la ecuación ajustada de la masa dentro del reactor en función del tiempo, la curva azul corresponde a la masa de producto en función del tiempo y la curva verde corresponde a la temperatura en función del tiempo. Las nubes de puntos negros corresponden a los datos experimentales de la masa dentro del reactor y las nubes de puntos amarillos corresponde a la temperatura medida en la mufla en función del tiempo. Se utilizó las ecuaciones 30 y 32 en la sección de ecuaciones para la temperatura y la masa dentro del reactor y los datos del cuadro 32 de la sección de datos originales y el cuadro 79 de la sección de datos calculados.

Cuadro No. 8 Análisis fisicoquímicos del producto sólido de pirólisis

Análisis fisicoquímico	Valor promedio obtenido
Poder calorífico en base húmeda (kJ/kg)	29699.0 ± 0.28
Porcentaje de humedad (%) base húmeda (g/g)	2.24 ± 0.000012
Porcentaje de cenizas (%)	10.50 ± 0.000046
Porcentaje de material volátil (%)	24.38 ± 0.00011
Porcentaje de carbono fijo (%)	62.89 ± 0.00012
Densidad de bulto aireada (kg/m ³)	237.61 ± 0.96
Densidad de bulto compacta (kg/m ³)	268.87 ± 1.18
Densidad de bulto de trabajo (kg/m ³)	241.86 ± 1.43
Porcentaje de nitrógeno (%)	2.33 ± 0.014

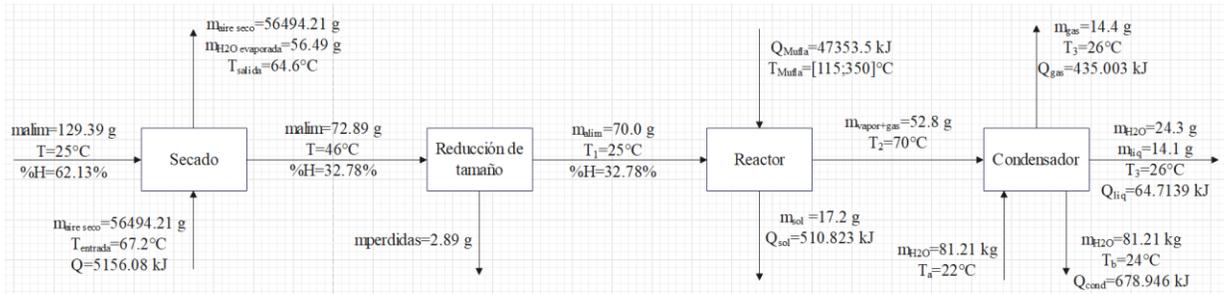
- Los datos presentados corresponden a los datos promedio de los análisis fisicoquímicos realizados al producto sólido. Se utilizó los datos de los cuadros 84, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93 y 97 en la sección de datos calculados.

Cuadro No. 9 Análisis fisicoquímicos del producto líquido de pirólisis

Análisis fisicoquímico	Valor promedio obtenido
Cromatografía GC-masas fracción ligera	Ácido acético
Cromatografía GC-masas fracción pesada	2-n-heptilfurano, nonadecano, eicosano, heptacosano, metil eicosatetranoato, 2-isoamilpirazina, 2,3-dimetil-3-hexanol
Poder calorífico de la fracción ligera en base húmeda (kJ/kg)	1383.18 ± 0.80
Poder calorífico de la fracción pesada en base húmeda (kJ/kg)	22759.56 ± 10.24
Densidad (kg/m ³)	1693.49 ± 4.61
Viscosidad dinámica (cP)	11.43 ± 0.02
Viscosidad cinemática (cSt)	6.75 ± 0.01

- Los datos presentados corresponden a los datos promedio de los análisis fisicoquímicos realizados al producto líquido. Se utilizó los datos de los cuadros 33, 34, 82, 83, 85, 86, 94, 95 y 96 en la sección de datos originales y calculados.

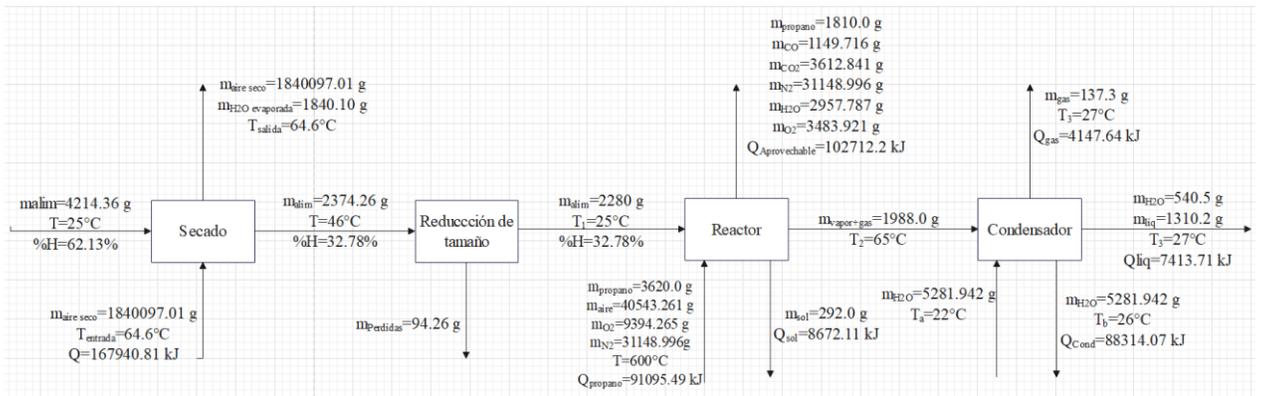
Figura No. 13 Balance de masa y energía del reactor de 100 g



(Fuente: propia)

- El balance de masa y energía del reactor de 100 g se realizó a partir de los datos de la corrida 4 con alimentación en proporción 50:50. Los datos correspondientes se encuentran en el cuadro 63 en la sección de datos calculados. Se utilizó una mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010, con un rango de temperatura de 25 a 1200°C. El diagrama se realizó en el software EdrawMax.

Figura No. 14 Balance de masa y energía del reactor de 7.6 kg



(Fuente: propia)

- El balance de masa y energía del reactor de 7.6 kg se realizó a partir de los datos de la corrida 3 de pirólisis. Los datos correspondientes se encuentran en el cuadro 73 en la sección de datos calculados. El diagrama se realizó en el software EdrawMax.

VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo se realizó la pirólisis de residuos de aguacate, primordialmente la cáscara y la semilla del fruto, con la finalidad de obtener y analizar los productos del proceso. En un primer punto, para la caracterización de la materia prima, tal como se observa en el Cuadro No. 1 en la sección de resultados. Se determinó un valor de densidad de bulto aireada para la mezcla de cáscara con semilla de $153.418 \pm 0.415 \text{ kg/m}^3$, un valor de densidad de bulto compacta de $202.575 \pm 0.547 \text{ kg/m}^3$ y una densidad de bulto de trabajo de $165.675 \pm 0.633 \text{ kg/m}^3$. Tal como se observa en los cuadros no. 46, 47 y 48, de análisis estadístico de la densidad de bulto, se obtuvo un coeficiente de variación 8.6% para la densidad de bulto aireada, 4.88% para la densidad de bulto compacta y 5.90% para la densidad de bulto de trabajo. A pesar de la variabilidad de tamaño que hay entre cada fruto, se obtuvo que no hubo variación significativa al realizar las mediciones de densidad de bulto con distinto material. La mayor variación se encuentra principalmente con la densidad de bulto aireada, esto se debe a que, debido a los distintos tamaños de fruto, la porosidad que existe entre cada partícula será relativamente distinta entre un conjunto de muestras que con otras. Esta variabilidad se reduce con la densidad de bulto compacta, esto se debe a que se reduce la porosidad entre las partículas sólidas, lo que redujo consecuentemente la variabilidad en la densidad de bulto. Finalmente, el valor obtenido de la densidad de bulto de trabajo es la relación de la densidad de bulto airea y compacta por medio del factor de compresibilidad, por lo que este dato es importante durante el dimensionamiento de equipos de transporte mecánico de sólidos por si se llegara a diseñar una línea de pirólisis de estos residuos a una mayor escala.

Se complementa la información para el diseño de sistemas mecánicos de transporte de sólidos por medio del tamaño de partícula. Tal como se observa en el Cuadro No. 1 de la sección de resultados, se obtuvo un tamaño de partícula promedio para la cáscara de $3.53 \pm 0.00025 \text{ cm}$ y un diámetro promedio para la semilla de $8.05 \pm 0.00025 \text{ cm}$. A pesar de las variaciones del tamaño entre cada fruto, tal como se mencionó previamente, no hubo una variación significativa entre las mediciones realizadas. Se obtuvo del análisis estadístico de los datos un coeficiente de variación para el diámetro de partícula de la cáscara de 3.82% y 4.04% para el diámetro de partícula de la semilla. Esto se debe a que al colocar las diez unidades aleatorias se tiene tanto cáscaras grandes como pequeñas, lo mismo sucede con la semilla obteniendo los valores promedio anteriormente mencionados. Dicho tamaño de partícula de cada partícula también es de interés para el dimensionamiento no solo de equipos de transporte mecánico de sólidos, como bandas transportadoras o elevador de cangilones, sino que también para dimensionar los molinos que se utilizan luego de realizar el proceso de secado de la materia prima.

Se observa que no hubo una variación significativa en las mediciones de la densidad de bulto, dado que se trata de un conjunto de sólidos apilados, y con el diámetro de partícula, al realizar la medición con múltiples unidades simultáneamente. No obstante, la masa de la partícula individual presenta una alta variabilidad. Esto se observa en los cuadros no. 49 y 50 correspondientes al análisis estadístico del tamaño y masa individual de partícula. Se obtuvo un valor promedio de la masa de cáscara de 14.04 ± 0.032 g con un coeficiente de variación de 21.81% y un valor promedio de la masa de la semilla de 25.85 ± 0.032 g con un coeficiente de variación de 39.01%. En este caso se observa el efecto de la diferencia de tamaños de partícula en los datos obtenidos ya que se tiene una variabilidad alta, por lo que los datos obtenidos no son representativos de lo que sería el valor promedio de la masa. No solo la diferencia de tamaño son la única razón por la cual se obtuvo una alta variabilidad en los valores obtenidos, sino que también el contenido de humedad que puede variar de una muestra a otra dependiendo del tiempo prolongado al ambiente, además de que implica un grado de descomposición del material.

Finalmente, se determinó la humedad promedio correspondiente de la cáscara y la semilla de aguacate. Tal como se observa en el cuadro no. 1 en la sección de resultados, se obtuvo un valor de porcentaje de humedad promedio para la cáscara de aguacate de $77.01 \pm 0.25\%$ y un porcentaje de humedad promedio para la semilla de $47.25 \pm 0.25\%$. Al realizar el análisis estadístico de ambos materiales, se determinó que los datos de humedad de la cáscara no presentaron una variación significativa a pesar de utilizar distintas cáscaras con distintos grados de avance en su descomposición, obteniendo un coeficiente de variación de 3.88%, además de que el valor promedio obtenido concuerda con lo reportado en la literatura de 75.3% (García, del Mar, & Castro, 2020). Por otra parte, al realizar el análisis estadístico de la semilla de aguacate se obtuvo un coeficiente de variación de 11.01%, el cual es relativamente alto, obteniendo cierta variación en algunos datos de la serie de datos medidos, lo cual pudo deberse a las condiciones de humedad del ambiente donde se cultivó y/o almacenó el producto previo a su consumo, además de las condiciones de cultivo del aguacate (Campos, Ayala, Agustín, & de la Cruz, 2012). No obstante, a pesar de que presenta cierta variabilidad en la humedad de la semilla, esta se encuentra en el rango de humedad reportado en la literatura de 35.2% a 57.0% (García, del Mar, & Castro, 2020). Los altos valores de humedad obtenidos se deben a la alta cantidad de humedad ligada y no ligada en la materia prima.

Para realizar el proceso de pirólisis, fue necesario reducir el contenido de humedad de la materia prima para realizar un proceso de reducción de tamaño y obtener un tamaño de partícula apto para alimentar en los reactores de pirólisis. Se optó por realizar dos procesos de secado, un secado solar y un secado directo por medio de un horno deshidratador de bandejas. Se observa en el Cuadro No. 2 en la sección de resultados, para el proceso de secado solar se redujo el contenido de humedad de la materia prima de un $77.01 \pm 0.25\%$ a $32.49 \pm 0.25\%$ para la cáscara de aguacate y de un $47.25 \pm 0.25\%$ a $41.11 \pm 0.25\%$ para la semilla. Se observa la notoria disminución del contenido de humedad de la cáscara, resultado que no se pudo observar de igual manera en la semilla de aguacate debido a que realizó el proceso de secado solar con la semilla completa (sin realizar algún tipo de molienda o partiendo los mismos a la mitad). Al utilizar la semilla completa y dado que el secado solar no proporciona tanta energía como lo haría un secado directo, no se permitió la transferencia de masa del seno de la semilla hacia el exterior con facilidad. Por otra parte, al realizar el secado directo en el horno deshidratador de bandejas, se redujo el contenido de humedad de la materia prima de un $77.62 \pm 0.25\%$ a $34.26 \pm 0.06\%$ para la cáscara y de un $49.65 \pm 0.25\%$ a $31.30 \pm 0.03\%$ de humedad para la semilla. En el caso del horno deshidratador se logró reducir el contenido de humedad de ambos materiales a un valor inferior a 35% donde se podrían tener pérdidas significativas en la molienda por acumulación.

Al realizar el análisis estadístico de ambos procesos de secado, se obtuvo un coeficiente de variación para el secado de la cáscara por medio de secado solar de 10.83% y un coeficiente de variación de 12.62% para la semilla. Mientras que en el secado directo por medio del horno deshidratador se obtuvo un coeficiente de variación para la cáscara de 7.51% y un coeficiente de variación para la semilla de 1.73%. Se tiene menor variabilidad en los datos obtenidos de la humedad posterior al secado dado que el secado directo por medio del horno deshidratador se logra un secado uniforme al estar en un ambiente controlado donde recibe directamente un flujo de aire caliente para realizar la difusión del contenido de humedad de la materia prima al aire de secado. Dicha uniformidad no se logra con el secado solar ya que depende de la hora del día y las condiciones climáticas de humedad y flujo de aire para que se dé el secado. Esto se observa también en los tiempos requeridos para el secado, dado que se observa la diferencia significativa entre un tipo de secado y otro, realizando el secado en el horno deshidratador de bandejas en 60 minutos, mientras que el secado solar se realizó en 5 días. El criterio seleccionado para parar el secado solar fue cuando la cáscara tuviese una estructura rígida y característica de material seco al tacto. Si bien el secado por medio del horno deshidratador de bandejas se realizó en un menor tiempo, este representa un aumento en los consumos energéticos globales de todo el proceso de pirólisis de aguacate, ya que de por sí dicho proceso consume una alta cantidad de energía. Debido a ello se evaluó el

secado solar, dado a que no se toma en cuenta como un consumo energético representativo en el balance global del proceso, aunque este implica un aumento en los tiempos operativos dado que se debe de realizar el secado durante varios días y este proceso de secado también implica un aumento en la oxidación y grado de descomposición de la materia prima, lo cual afecta a la composición del producto líquido de pirólisis. Si se realizara un proceso a mayor escala, se podría utilizar los gases de combustión del horno utilizado para realizar la pirólisis como un economizador y realizar el secado de la materia prima o aprovechar el producto gaseoso de pirólisis realizando una combustión de los mismos.

Luego de realizar el proceso de secado se realizó el proceso de reducción de tamaño de la materia prima por medio de dos molinos. Tal como se observa en el Cuadro No. 3 en la sección de resultados, se realizó la molienda en un molino de discos y en una trituradora de cuchilla o trituradora de residuos orgánicos. En el caso del molino de discos se evaluó la molienda únicamente de la cáscara de aguacate y no de la semilla debido al tamaño y rigidez de la misma, lo que podría dañar el molino utilizado. Para la molienda de la cáscara se obtuvo una eficacia de molienda del $94.12 \pm 4.04\%$, teniendo una cantidad de 0.20 ± 0.14 kg de acumulación y pérdidas. Por otra parte, para la molienda de la trituradora de cuchillas se utilizó tanto la cáscara como la semilla, obteniendo una eficacia de molienda para la materia prima seca de $96.03 \pm 0.32\%$, teniendo una cantidad de 0.17 ± 0.014 kg de acumulación y pérdidas en el sistema. En ambos casos, una parte de las pérdidas se deben en parte al contenido de humedad aún presente en la materia prima, lo que ocasionaron que estos se acumularan dentro del molino formando una pasta sólida húmeda de materia prima dentro de ambos equipos. Por otra parte, se tuvo pérdidas de material al ambiente, es decir, que salieron del sistema de molienda, sobre todo con la trituradora de cuchillas debido a que, en la trituradora de cuchillas, al moler material, este salía con alta velocidad del equipo lo que ocasionaba la ruptura de la bolsa donde se recolectaba el producto. Además, al realizar la recuperación de material acumulado de ambos molinos, al utilizar aire comprimido se fluidizó mucha materia sólida molida.

A pesar de lo anterior mencionado, en ambos casos se obtuvo una eficacia de molienda por arriba del 90% para ambos molinos, pero solo la trituradora de cuchillas obtuvo una eficacia por encima del 95%. Debido a ello, y a que se podían procesar simultáneamente ambos materiales se determinó que el molino adecuado para la molienda de los residuos de aguacate fue la trituradora de cuchillas. Finalmente, se evaluó para la molienda en la trituradora de cuchillas, realizar el proceso de molienda con materia prima sin secar para su comparación con la materia prima seca. Se obtuvo una eficacia del $92.42 \pm 0.17\%$ para la molienda de la materia prima sin secar, si bien esta eficacia de molienda es superior al 90%, aún se

tiene una cantidad de pérdidas significativas. Al utilizar una alimentación de 7.92 ± 0.01 kg se obtuvo 0.60 ± 0.014 kg de pérdidas, lo cual representa un 7.6% en proporción con respecto a la alimentación. Si bien la eficacia de la molienda es menor, se puede realizar el proceso de molienda en un primer paso y realizar posteriormente el proceso de secado con el material molido con la finalidad de que la materia prima tenga mayor superficie expuesta al secado.

Finalmente, al realizar el análisis granulométrico de los molinos utilizados, tal como se observa en las figuras 9 y 10 en la sección de resultados, se obtuvo una mayor cantidad material con tamaño de partícula en el rango de 0.355 a 0.850 mm en la trituradora de cuchillas que en el molino de discos. En base a esto y lo anterior mencionado con las eficacias de los molinos, se puede observar que es favorable el uso de la trituradora de cuchillas dado que se obtiene más material molido con tamaño de partícula relativamente grande para el proceso de pirólisis, de esta manera se evita la formación de material carbonizado fino y que facilite el manejo del producto al completarse el proceso. Esto último parece inicialmente no ser un problema al observar las curvas de análisis granulométrico ya que no se obtiene mayor cantidad de material fino del proceso de molienda.

Se realizó el proceso de pirólisis en dos reactores, uno con capacidad de 100 g y otro con capacidad de 7.6 kg. En un primer punto, para el reactor de pirólisis de 100 g, tal como se observa en el Cuadro No. 4 en la sección de resultados, se realizó el proceso realizando dos tipos de alimentación, una con una proporción de alimentación 50:50 de cáscara y semilla y una proporción de alimentación aleatoria, para ambos casos la operación se realizó a un rango de temperatura de 115°C a 350°C. La proporción de alimentación 50:50 se seleccionó en términos másicos, no obstante el aporte de cada material es distinto por lo que se debe de realizar un análisis posterior de cómo varía el proceso de pirólisis de residuos de aguacate a distintas proporciones de alimentación al reactor o utilizando la proporción promedio del fruto en términos másicos. Al obtener los rendimientos para la alimentación 50:50, se obtuvo un rendimiento de producto sólido o char de $22.78 \pm 0.080\%$, un rendimiento de producto líquido de $20.37 \pm 0.079\%$, un rendimiento de agua de $35.77 \pm 0.083\%$ y un rendimiento de producto gaseoso de $21.08 \pm 0.157\%$. Se observa que la proporción de productos de pirólisis es relativamente similar, teniendo un rendimiento promedio mayor de char para el caso de los productos. No obstante, la mayor cantidad de producto obtenido del reactor es agua, lo cual concuerda con el porcentaje de humedad promedio determinado para el material molido, el cual se encuentra en el Cuadro No. 59 en la sección de datos calculados. Esto se debe a que al realizar el proceso de pirólisis se realiza nuevamente un proceso de secado inicial de la materia prima dentro del reactor, donde se logra evaporar tanto el

contenido de humedad no ligada como la humedad ligada en la estructura de la materia prima. Por otra parte, al obtener los rendimientos en base seca se tiene en promedio de $35.46 \pm 0.22\%$ para el producto sólido, $31.72 \pm 0.22\%$ para el líquido y $32.82 \pm 0.30\%$ para el gas, valores similares reportados a los que se encuentran en la literatura, de 32.0% de producto líquido, 34.0% para el producto sólido y 34.0% de producto gaseoso para la pirólisis de semilla de aguacate (Yarbay, Dolas, Yargiç, & Özbay, 2020). Si bien el proceso realizado es con una mezcla de cáscara con semilla, se obtiene un rendimiento similar para el producto líquido y las ligeras diferencias observadas para los productos sólido y gaseoso se deben a la adición de la cáscara el cual posee lignina en distinta proporción a la semilla, lo cual afecta directamente en el rendimiento de los productos (García, del Mar, & Castro, 2020).

Al realizar el análisis estadístico de los resultados obtenidos de la pirólisis con una proporción de alimentación 50:50, tal como se observa en el Cuadro No. 65 en la sección de datos calculados, se obtuvo un coeficiente de variación de 6.20% para el char, 4.09% para el producto líquido, 1.82% para el agua y 3.46% para el producto gaseoso. En todos los casos se observa que no hubo variabilidad significativa entre cada serie de datos obtenidos, esto se debe a que todo el tiempo se mantuvo la misma proporción en la alimentación. Las posibles fuentes de variación se pueden dar por el grado de oxidación y descomposición de la materia prima, así como el porcentaje de humedad de la materia prima. Al realizar el análisis estadístico en base seca se obtiene un coeficiente de variación para el char de 5.87% , 4.04% para el producto líquido y 3.66% para el producto gaseoso, por lo que la humedad tiene un cierto efecto en la variabilidad de los rendimientos finales, más no obstante, esta es principalmente por el estado de la materia prima.

Se realizó de igual manera el proceso de pirólisis en el reactor de 100 g pero para una alimentación aleatoria, donde no se conoció la proporción de cáscara y semillas alimentada al reactor. Tal como se observa en el Cuadro No. 4 en la sección de resultados, se obtuvo un rendimiento promedio de char de $14.71 \pm 0.08\%$, de $46.00 \pm 0.09\%$ para el producto líquido, de $30.14 \pm 0.09\%$ para el agua y $9.14 \pm 0.17\%$ para el producto gaseoso. De igual manera se calculó los rendimientos en base seca, los cuales se observan en el Cuadro No. 5 en la sección de resultados, donde se obtuvo un rendimiento promedio de char de $21.08 \pm 0.12\%$, de $65.79 \pm 0.14\%$ para el producto líquido y de $13.12 \pm 0.24\%$ para el producto gaseoso. Estos rendimientos obtenidos no son similares a los reportados en la literatura para pirólisis de aguacate tal como se mencionó anteriormente, esto se debe a que al tener una proporción de alimentación aleatoria ya no se la cantidad de cáscara y semilla y su aporte a los productos. Por otra parte, se observa en el análisis estadístico de los rendimientos que se obtuvo un coeficiente de variación de 24.33% para el

char, 7.78% para el producto líquido, 5.47% para el agua y 18.75% para el producto gaseoso. Para el análisis estadístico de los rendimientos en base seca se obtuvo un coeficiente de variación de 14.71% para el char, 5.54% para el producto líquido y 20.72% para el producto gaseoso. Se observa que existe una alta variación en los datos, sobre todo con el producto sólido y el producto gaseoso, esto se debe a lo anterior mencionado, al ser alimentación aleatoria, la proporción de cada material en el reactor no se conoce por lo que cambia la proporción de los productos significativamente entre una corrida y otra.

Por lo que, al comparar ambos procesos de pirólisis en el reactor de 100 g, tanto para alimentación en proporción 50:50 como para la proporción de alimentación aleatoria, resulta evidente que la variabilidad de los resultados obtenidos cuando se utiliza una alimentación con proporción conocida se mantiene incluso cuando se varía la masa de alimentación, dado que siempre es la misma proporción de alimentación. Mientras que al variar alimentación, realizando una alimentación en proporción aleatoria, se tienen rendimientos de productos variados, se puede observar este hecho de igual manera al comparar la conversión de un tipo de alimentación con otra, para la alimentación 50:50, se tiene una conversión promedio de $64.54 \pm 0.58\%$, mientras que en la alimentación aleatoria se tiene una conversión de $78.92 \pm 0.13\%$, ambas en base seca. Si bien la conversión en el proceso aleatorio es mayor, puede ser porque hubo una mayor proporción de semilla en la alimentación, lo cual aportó al rendimiento de producto líquido y gaseoso, por los ácidos grasos presentes en la semilla. No obstante, se debe de realizar un análisis variando las proporciones de cada uno, evaluar los rendimientos y analizar el comportamiento del proceso.

En cuanto a la operación del reactor de 100 g, se tiene que la chimenea de los gases que salen del reactor tiene un tramo el cuál no se encuentra recubierto con cañuela, donde está expuesto al ambiente y por ende se da un intercambio de calor. Este intercambio de calor fomenta el cambio de fase de los gases antes de llegar al condensador, lo que implica que le toma más tiempo salir del sistema a una cantidad de masa determinada. Por otra parte, dado que el reactor no es un ambiente completamente inerte, hay oxidación del material y de los productos de pirólisis, esto se observa en la composición del producto líquido, lo cual se mencionará posteriormente. Por lo que, el uso de un ambiente inerte como nitrógeno podría favorecer la composición del líquido final. Finalmente, la rampa de temperatura utilizada para el proceso también influye, dado que se realizó una pirólisis convencional, teniendo una tasa de aumento de temperatura relativamente baja de $0.75^\circ\text{C}/\text{min}$, ya que si se aumenta la tasa de calentamiento, se llega a condiciones de pirólisis rápida donde se favorecería la formación de producto líquido. Si se desea realizar un aumento de la temperatura se debe de mejorar el aislamiento de la chimenea dado que, al vaporizarse y

gasificarse la masa en un menor tiempo, el reflujo en la chimenea aumentaría y un intercambio de calor en la chimenea provocaría que los gases condensen e incluso se solidifiquen. El hecho de que se solidifique en la chimenea implica que los gases no puedan salir del reactor y llegar al condensador, lo que podría implicar un aumento de la presión del reactor y representaría un peligro por el riesgo de explosión.

Por otra parte, se realizó el proceso de pirólisis en el reactor de 7.6 kg, donde se utilizó una proporción de alimentación aleatoria para todas las corridas. Tal como se observa en el Cuadro No. 6, en la sección de resultados, se obtuvo un rendimiento promedio de char de $14.33 \pm 0.15\%$, un rendimiento de producto líquido de $60.60 \pm 0.25\%$, un rendimiento de agua de $17.21 \pm 0.17\%$ y un rendimiento de producto gaseoso de $7.86 \pm 0.39\%$. Además, se obtuvo los rendimientos en base seca de char de $17.28 \pm 0.31\%$, un rendimiento de producto líquido de $73.28 \pm 0.53\%$ y un rendimiento de producto gaseoso de $9.44 \pm 0.57\%$. Se observa que el producto con mayor rendimiento es el producto líquido al igual que en el reactor de 100 g cuando se tenía una alimentación aleatoria. No obstante, al haber realizado el análisis cromatográfico del producto líquido como se mencionará posteriormente, se determinó una cantidad relativamente elevada de agua presente en el producto líquido, lo que afecta los rendimientos obtenidos. Esto se debe a que en el sistema utilizado se utiliza un quemador de propano y no se utiliza una resistencia para proporcionar calor al sistema, lo cual no solo conlleva a cambios en los modelos de transferencia de calor, sino que también el utilizar un quemador de propano implica que no se va a tener una llama completamente estable que proporcione una temperatura fija en un momento dado del proceso. Esto también se pudo notar al momento de encender la llama y colocar la temperatura para dar inicio al proceso de pirólisis, dado que al no contar con un sensor que indique directamente la temperatura de la flama, no se puede controlar fácilmente la temperatura inicial. A poca abertura de la válvula de gas propano se mantuvo una temperatura relativamente estable en el reactor de 120°C , lo que permitió que se realizara el proceso de secado inicial de la materia prima para remover la humedad ligada de la materia prima. No obstante, conforme avanzaba el proceso, la cantidad de agua dentro de la materia prima reducía haciendo que la capacidad calorífica y conductividad térmica del medio cambiara, lo cual se puede observar en los datos de temperatura en función del tiempo en el Cuadro No. 31 en la sección de datos originales. El aumento gradual de la temperatura permitió que el sistema llegara a una temperatura de hasta casi 170°C para la misma apertura inicial de la válvula de gas propano. A dichas temperaturas se comenzaba a obtener producto líquido, por lo que el criterio utilizado para indicar que se finalizó el secado y se daba inicio a la pirólisis como tal era el cambio de tonalidades y color en la solución líquida obtenida del condensador. Debido a ello se obtuvo un alto rendimiento de producto líquido en el proceso

para el reactor de 7.6 kg, lo que implica realizar un proceso de deshidratación posterior para reducir el contenido de agua y cuantificar los rendimientos en base seca de los productos de pirólisis.

Al realizar los análisis estadísticos de los rendimientos de pirólisis, tal como se observa en el Cuadro No. 75 en la sección de datos calculados, se obtuvo un coeficiente de variación para el char de 16.32%, un coeficiente de variación del producto líquido de 4.61%, de 32.72% para el agua y de 37.77% para el producto gaseoso. Por otra parte, se obtuvo para los rendimientos en base seca un coeficiente de variación del producto sólido de 13.16%, de 2.59% para el producto líquido y de 34.03% para el producto gaseoso. Se observa la alta variación en los datos obtenidos, atribuidos esencialmente a la variabilidad de la materia prima, al utilizar la alimentación aleatoria, esto se observa con el char tanto en base húmeda como base seca, lo cual se debió a la humedad de la materia prima utilizada, siendo la cáscara y la semilla molida. Dado que se realizó el proceso de molienda de toda la materia prima al realizar los análisis de molienda, hubo una gran parte de la materia prima que pasó almacenada en el cuarto frío, por lo que el contenido de humedad del material aumentó significativamente. Por esta razón se tiene una variabilidad en los rendimientos de char obtenidos. Por otra parte, para el producto gaseoso se tiene de igual manera una alta variabilidad dado que al utilizar una proporción de alimentación aleatoria, cambian los rendimientos de producto sólido y líquido entre una corrida y otra.

En cuanto a la operación del reactor, comparando con el reactor de 100g, al realizar el cambio de escala y de sistema, cambian los modelos de transferencia de calor y masa. Esto se observa con el hecho de que en el reactor de 7.6 kg se requiere un tiempo significativamente mayor de operación con respecto al reactor de 100 g. Esto se nota principalmente con que el reactor de 100 g se encuentra dentro de un horno mufla, lo que permite que la transferencia de calor se de en todo el reactor y no únicamente en una de las caras de la superficie del mismo. Mientras que en el reactor de 7.6 kg, se utiliza un quemador de gas propano, el cual se encuentra directamente debajo del reactor, que si bien se cuenta con el ladrillo refractario alrededor del mismo para evitar pérdidas de energía en forma de calor al ambiente, cambia la transferencia de calor y el punto donde se recibe mayor cantidad de energía es directamente por debajo del reactor. Además, la parte superior del reactor se encuentra expuesta al ambiente por lo que se da la transferencia de calor entre la parte superior del reactor y el ambiente, representando pérdidas térmicas. Esto se podría resolver si se colocara algún sistema de agitación dentro del reactor, lo que podría permitir una distribución más homogénea dentro del reactor que permita mejorar la transferencia de calor. Esto se podría lograr por medio de un agitador tipo ancla a bajas revoluciones. Sin embargo, dada la configuración del reactor de 100 g, esto no se podría lograr, por lo que se recomienda evaluarlo en el

reactor de 7.6 kg. Razón por la cual el proceso en el reactor de 7.6 kg toma una mayor cantidad de tiempo a comparación del reactor de 100 g. Por otra parte, la tasa de calentamiento en el reactor de 7.6 kg es variable y no controlable como en el reactor de 100 g debido a que con pequeñas variaciones en la apertura de la llave del quemador se obtenían cambios significativos en la temperatura. En el reactor de 100 g se obtuvo una tasa de calentamiento de $0.75^{\circ}\text{C}/\text{min}$, mientras que en el reactor de 7.6 kg se obtuvo tasas de calentamiento de $0.22^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $0.31^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $2.51^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $3.14^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y $0.57^{\circ}\text{C}/\text{min}$, correspondientes a cada una de las rampas de temperatura del cuadro no. 31 en la sección de datos originales. Se observa que hay tasas de calentamiento inferiores a $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, correspondientes a las rampas de temperatura donde hubo un aumento gradual de temperatura debido a los cambios de la capacidad calorífica del material dentro del reactor. Con lo anterior mencionado, si se determina un valor promedio se tiene que se tiene una tasa de calentamiento del proceso de $1.35^{\circ}\text{C}/\text{min}$, la cual es superior a la del reactor de 100 g y que en parte también explica porque se obtuvo altos rendimientos de producto líquido.

Otro aspecto a tomar en cuenta durante la operación del reactor de 7.6 kg fue que también pudo haber variaciones en algunos instantes del proceso debido a la presencia de un reflujo en la salida del reactor de gases. Estos gases con alta temperatura refluaban a la salida del reactor ocasionando ciertas variaciones en la temperatura. Por otra parte, como se mencionó anteriormente, la materia prima poseía un contenido de humedad por encima del 40%, por lo que al realizar el secado este naturalmente se compactaría por lo que parte del termopozo podía no estar sumergido en la materia prima durante el proceso y medir adecuadamente la temperatura. Esto último se corrigió en las demás corridas a partir de la densidad de bulto aireada del material molido y el contenido de humedad promedio para determinar el excedente de masa a añadir en el reactor para asegurar que luego del secado, el termopozo siguiera sumergido en el material sólido. Para el sistema del quemador, se realizó el balance másico de la combustión en base a la ecuación de combustión teórica de propano para determinar la cantidad de propano que reaccionó y la salida de los gases de combustión. Se utilizó un porcentaje de exceso de aire del 28.1% y se determinó que para realizar la combustión incompleta del propano se requirió de un 50.0% de eficiencia de combustión, lo cual se observa en la Figura 14 correspondiente al balance másico del sistema de 7.6 kg (Engineering Toolbox, 2003). Sin embargo, para realizar tanto un balance de masa y de energía acorde a la operación real, es necesario utilizar un analizador de gases de combustión para determinar la composición de los gases de salida.

No obstante, el sistema de 7.6 kg fue efectivo para realizar el proceso de pirólisis de aguacate. Esto se observa en el Cuadro No. 76 en la sección de datos calculados, al determinar la conversión en

base seca para las corridas de pirólisis incompleta y completa, se obtuvo una conversión de aproximadamente 65% para el proceso incompleto, mientras que en el proceso completo se obtuvo una conversión promedio de $82.72 \pm 0.84\%$ para el proceso completo. Por lo que el sistema puede utilizarse para la pirólisis de biomasa y obtener conversiones altas de biomasa en producto.

Teniendo las variaciones previamente mencionadas sobre los dos reactores, se realizó un análisis cinético a cada uno. Tal como se observa en las Figuras 11 y 12 en la sección de resultados, se analizó la temperatura en función del tiempo y el cambio de masa dentro del reactor en función del tiempo. Se obtuvo una ecuación de la temperatura en función del tiempo y de la masa dentro del reactor en función del tiempo tal como se observa en las ecuaciones 29 a 32 en la sección de ecuaciones.

Al analizar individualmente el reactor de 100 g, se puede observar que la ecuación de la temperatura utilizada, siendo la ecuación de Boltzmann modificada para el horno mufla, que no se acopla del todo a los datos experimentales. Dado que la ecuación predice la temperatura dentro del reactor en función del tiempo, mientras que el sensor de temperatura del equipo se encuentra en la parte trasera del equipo, por lo que mide la temperatura en el ambiente de la mufla y no la temperatura dentro del reactor. Debido a ello se observa en la Figura 11 en la sección de resultados que el modelo generado de la temperatura no se acopla a los datos experimentales de temperatura en función del tiempo. Para solucionar esta variación entre el modelo y los datos experimentales, se debe de realizar un análisis y realizar un modelo de transferencia de calor dentro del reactor de 100 g. Dicho análisis debe de tomar en cuenta la transferencia de calor por convección y conducción en la superficie y paredes del reactor, cómo varía la capacidad calorífica y conductividad térmica del sistema y que tome en cuenta el reflujo de gas al reactor que implica variaciones de la temperatura del mismo. Para el cambio de masa del reactor en función del tiempo, se observa en los primeros minutos del proceso que no hay un decaimiento en la masa, correspondiente al arranque del equipo y al precalentamiento. Debido a ello, se realiza el modelo como una función por partes, donde inicialmente la masa no cambia dentro del reactor hasta llegar a la temperatura de 115°C , dato obtenido experimentalmente. Luego el modelo contempla el decaimiento de la masa por medio de la constante de Arrhenius, el orden de reacción y la diferencia de masa instantánea con la masa de char. Se puede observar que la mayoría del proceso se tiene una línea recta representando el decrecimiento de la masa en el reactor. Se tiene que el descenso de la masa en el reactor tiene un comportamiento lineal debido a las condiciones controladas del medio. Sin embargo, se puede observar alrededor del minuto 200, un quiebre en la curva, representando la obtención de la fracción pesada del producto líquido a elevadas temperatura, y se desacelera la reducción de masa del reactor.

Al analizar el reactor de 7.6 kg, obtuvo una ecuación que predice la temperatura en función del tiempo, tal como se observa en la ecuación 30 en la sección de resultados. Dicha ecuación es una modificación de la ecuación de Boltzmann para hornos mufla y toma en cuenta las rampas de temperatura del proceso y los efectos del cambio de la capacidad calorífica y conductividad térmica del material dentro del reactor en función de la temperatura. Tal como se observa en la Figura 12 en la sección de resultados, la ecuación producida de la temperatura se acopla a los datos experimentales adecuadamente, por lo que se puede utilizar en el mismo modelo de la masa en función del tiempo que en el reactor de 100 g. Se observa que los modelos generados, tanto para la temperatura como para la masa, se acoplan a los datos experimentales. Al igual que en el reactor de 100 g, se utiliza una función por partes para modelar la masa en función del tiempo. Se puede observar que desde que comienza a decaer la masa hasta aproximadamente el minuto 230 se tiene que el comportamiento de la masa en el reactor decrece linealmente con el tiempo, tramo correspondiente al secado del material dentro del reactor y al inicio de la obtención de producto líquido. Se puede observar aproximadamente en el minuto 235, un quiebre en la función, correspondiente no solo al aumento en la obtención de producto líquido, sino que también al punto donde se realizó el aumento significativo de la temperatura, de 171°C a 250°C. Este efecto de quiebre en la función se observa nuevamente alrededor del minuto 360, donde nuevamente se tiene un aumento de temperatura de 288°C a 328°C, correspondiente a la fracción pesada del producto líquido. Al igual que en el reactor de 100 g, es en este punto donde se desacelera el cambio de masa en el reactor, hasta llegar a la masa final de char.

Al comparar ambos modelos, se observa en un primer punto que el tiempo requerido en el reactor de 100 g es significativamente menor que el tiempo requerido en el reactor de 7.6 kg. Se observa inicialmente las variaciones entre un modelo y otro con el primer decaimiento de masa, correspondiente al inicio del secado del material dentro del reactor. Se observa un cierto retraso del cambio de masa a la salida del reactor, una de las razones por las cuales se obtuvo un decaimiento de masa hasta 120°C, a diferencia del reactor de 100 g, donde se obtiene a 115°C. Este retraso se debe a que en el sistema de 7.6 kg hay diferencias significativas en los fenómenos de transporte. Inicialmente con la transferencia de calor que únicamente se da en la parte inferior del reactor como se mencionó anteriormente, al recibir directamente la flama no se tiene un calentamiento homogéneo en todo el reactor, por lo que no todo el material recibe la misma energía. Por otra parte, la porosidad que existe entre las partículas sólidas también afecta los fenómenos, en este caso los tres fenómenos, la transferencia de calor que se da de la superficie inferior del reactor con la materia prima, que a su vez realizan la transferencia de masa

realizando la evaporación. Luego de la evaporación, la transferencia de momentum del gas producido para salir del reactor, pero debido a la porosidad, la cual, si es baja, impide la salida del gas inicial, lo que conlleva a que este se eleve por una porción del reactor y condensándose nuevamente debido a que no todo el material se encuentra homogéneo en términos de transferencia de calor. Debido a estos aspectos de conductividad térmica y porosidad dentro del reactor, se requiere de una mayor cantidad de energía para lograr que una masa de producto salga del reactor y por ende conlleva una mayor cantidad de tiempo realizar el proceso.

Siempre comparando ambos modelos, se observa que la ecuación de la temperatura del reactor de 7.6 kg se acopla más a los datos experimentales que el reactor de 100 g. Esto se debe que la ecuación generada toma en cuenta todas las rampas de temperatura, la tasa de calentamiento y que la temperatura medida era exactamente la temperatura dentro del reactor gracias al termopozo del sistema. Mientras que el reactor de 100 g no se acopla a los datos experimentales dado que se trata de la temperatura dentro de la mufla (exterior al reactor) y no la temperatura dentro del reactor.

A pesar de las diferencias de las ecuaciones producidas de temperatura en función del tiempo, se obtuvo para ambos reactores que el modelo del decaimiento de la masa dentro del reactor en función del tiempo se ajustó adecuadamente a los datos. Sin embargo, las constantes de cada ecuación son distintas, siendo estas la energía de activación y la constante de frecuencia de la ecuación de la constante de Arrhenius y el orden de reacción. Al comparar las constantes obtenidas, se observa que en el reactor de 7.6 kg se tiene un valor mayor de energía de activación que en el reactor pequeño, siendo 19150 kJ/kmol y 8305.886 kJ/kmol respectivamente. Se tiene casi el doble de energía de activación no solo por la diferencia de escala sino por lo mencionado anteriormente de los fenómenos de transporte, se requiere de una mayor cantidad de energía para lograr que una partícula salga del reactor. Por otra parte, se obtiene un orden de reacción mayor para el reactor de 7.6 kg por el cambio de escala, se obtuvo un orden de reacción para el sistema de 7.6 kg de 0.78 y un orden de reacción para el sistema de 100 g de 0.55. La diferencia observada en los órdenes de reacción se debe a que se tiene una mayor cantidad de masa inicial y en el cual se requiere de un mayor tiempo para completar el proceso. Dado que, en proporción con respecto al reactor de 100 g, se tienen cambios más remarcados en la masa del reactor se obtiene un orden de reacción mayor. Finalmente, para la constante de frecuencia de la ecuación de la constante de Arrhenius, se obtiene de igual manera que el valor del reactor de 7.6 kg es mayor al del reactor de 100 g. Se obtuvo una constante de frecuencia de 2.93551 para el reactor de 7.6 kg y una constante de frecuencia de 0.44524 para el reactor de 100 g. Sin embargo, la constante de Arrhenius en el reactor de 100 g alcanza

valores superiores a los del reactor de 7.6 kg en menor tiempo. Esto se debe al comportamiento de la temperatura en el tiempo y el hecho de que se obtiene el char en menor tiempo en el reactor de 100 g, mientras que en el reactor de 7.6 kg, sigue un comportamiento similar a las rampas de temperatura, por lo que le toma más tiempo llegar al valor máximo al finalizar el proceso. Si se graficara la constante de Arrhenius con el tiempo y se sobrepone con los datos de temperatura, se observaría un aumento brusco del valor de la constante con el aumento de las rampas de temperatura. Se tiene entonces que, dada la mayor cantidad de masa en proporción al reactor de 100 g, la constante de Arrhenius en el sistema de 7.6 kg es menor en función del tiempo y la temperatura.

Al realizar los balances de masa y energía para ambos sistemas, tal como se observa en las figuras 13 y 14 en la sección de resultados, se observa que los balances energéticos en ambos casos no cuadran. No se logra a tener un balance de energía dado que la energía proporcionada por los productos no llega a ser igual o superior a la energía suministrada al proceso. Para el sistema de 100 g, se tiene que para el proceso de 4.25 horas, se suministran 47353.5 kJ de energía en forma de calor, mientras que los productos proporcionan 510.823 kJ para el char, 64.7139 kJ para el producto líquido y 435.003 kJ para el producto gaseoso. La energía proporcionada por los productos se determinó para el char por medio del valor promedio de poder calorífico en base húmeda obtenido, el cual se mencionará posteriormente. La energía del producto líquido por medio de la composición del producto, teniendo 85% de fracción ligera y 15% de fracción pesada y utilizando el poder calorífico en base húmeda promedio de cada fracción como se mencionará posteriormente. La energía del producto gaseoso se determinó por medio de la composición teórica del producto gaseoso. Al sumar la energía de los tres productos se tienen 1010.5401 kJ de energía aprovechables, los cuales se encuentran significativamente por debajo de la energía proporcionada con 46342.96 kJ de diferencia únicamente con el proceso de pirólisis. Si se toma en cuenta el proceso de secado se tiene que se suministran 103,847.71 kJ de energía al proceso.

En el caso del reactor de 7.6 kg, se da el mismo caso, se tiene que la energía proporcionada por los productos es de 20233.455 kJ, mientras que la energía proporcionada por la combustión de propano es de 134746.09 kJ. Se tiene una diferencia significativa de 114512.6 kJ únicamente con el proceso de pirólisis, teniendo en total 259,036.3 kJ con el secado incluido, que incluso a pesar de tomar la reacción de combustión de propano como la combustión incompleta teórica, la diferencia es muy elevada. Se observa que, en ambos casos, la energía proporcionada por los productos no llega a sobrepasar a la energía suministrada al proceso. Lo que indica que no solo el proceso no es rentable energéticamente, se debe de realizar un análisis económico y determinar si de igual manera el proceso no es rentable

económicamente. Debido a ellos se optó por comparar la energía liberada por los productos con la energía que liberaría la materia prima si se realizara una combustión directa de la biomasa. A partir del valor teórico de 19145 kJ/kg del poder calorífico para la semilla de aguacate, se tiene para el reactor de 100 g y una alimentación de 70 g que la energía proporcionada en base seca es de 1340.15 kJ. Este valor sobrepasa a la energía proporcionada por los productos de pirólisis con una diferencia de 329.61 kJ. En el caso del reactor de 7.6 kg se tiene que la energía proporcionada por una alimentación de 2280 g en base seca es de 22763.79 kJ, lo cual es superior a la energía proporcionada por los productos por una diferencia de 2530.33 kJ.

Según lo anterior mencionado, se puede observar que energéticamente, el proceso de pirólisis de aguacate no es factible, dado que no se compensa la energía proporcionada al proceso y la energía que se obtiene de la quema directa de la biomasa es superior energéticamente. Para lograr que la energía proporcionada por los productos de pirólisis sobrepase a la de la biomasa, se tendría que realizar un proceso de deshidratación del producto líquido, de modo que el poder calorífico de la fracción ligera de pirólisis se asemeje al valor teórico del poder calorífico del ácido acético. Posteriormente se menciona la composición del combustible líquido para cada fracción obtenida. Al utilizar el valor teórico de 14000 kJ/kg para la fracción ligera se obtendría una mayor energía por parte de los productos de pirólisis. En el caso del reactor de 7.6 kg, se obtendría una energía de 33457.9 kJ, logrando superar la energía de la biomasa por 10694.11 kJ (Engineering ToolBox, 2017). Sin embargo, el realizar esto implicaría un aumento en el consumo energético global del proceso, lo que lo volvería menos rentable energética y económicamente.

Finalmente, al comparar los rendimientos en base seca de pirólisis de residuos de aguacate con la de otros combustibles de pirólisis, se tiene para la pirólisis de madera un rendimiento de char de 24%, un rendimiento de producto líquido de 51% y un rendimiento de producto gaseoso de 25%. Al compararlo con el proceso de pirólisis de aguacate, se tiene para la proporción de alimentación aleatoria rendimientos similares, con la diferencia de que se obtuvo un rendimiento de fase líquida mayor de $65.79 \pm 0.14\%$ y menor para el producto gaseoso de $13.12 \pm 0.24\%$. Para la pirólisis de residuos de uva se tiene un rendimiento de producto líquido de 38%, un rendimiento de char de 37% y un rendimiento de producto gaseoso de 25%. Se observa nuevamente las diferencias entre cada rendimiento, repitiendo el caso de que se obtuvo un mayor rendimiento en la fase líquida en el proceso de pirólisis de residuos de aguacate. Finalmente, para la pirólisis de paja, se tiene un rendimiento de producto líquido de 43%, un rendimiento de char de 33% y un rendimiento de producto gaseoso de 24%. Las principales diferencias del proceso

realizado de pirólisis de residuos de aguacate con los reportados en la literatura para distintos tipos de biomasa es la composición de cada uno, principalmente en el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de cada material. Tanto la cáscara como la semilla del aguacate poseen un contenido relativamente elevado de celulosa y hemicelulosa y la cáscara posee un alto contenido en lignina. Además, la semilla de aguacate posee un alto contenido de ácidos grasos que aportan al rendimiento de producto líquido. Esto último permite determinar la diferencia entre rendimientos de la pirólisis de cáscara de aguacate con el de otro tipo de biomasa. Además, de que las condiciones reportadas a la temperatura y a la tasa de calentamiento realizadas experimentalmente en ambos reactores. No obstante, se tiene que en general los rendimientos de los productos de pirólisis de residuos de aguacate se asemejan a datos reportados en la literatura para distintos tipos de biomasa.

Finalmente, una vez realizados los procesos de pirólisis, se realizó los análisis fisicoquímicos de los productos de pirólisis. Iniciando con el producto sólido, se determinó que el valor promedio del poder calorífico en base húmeda es de 29699 ± 0.28 kJ/kg, tal como se observa en el Cuadro No. 8 en la sección de resultados. Al realizar el análisis estadístico del mismo se observa que el coeficiente de variación obtenido fue de 4.75%, valor relativamente bajo, por lo que no hubo una variación significativa en los poderes caloríficos medidos. Dado el bajo contenido de humedad se obtuvo un valor relativamente alto para el poder calorífico, además de explicar la poca variación entre una muestra y otra. Al comparar el poder calorífico obtenido con el valor teórico del poder calorífico del grafito, de 32,806 kJ/kg, el valor obtenido es bastante cercano al del grafito teórico (Engineering ToolBox, 2017). Al comparar el valor promedio de poder calorífico obtenido con el poder calorífico del char obtenido de la pirólisis de madera, el cual posee un valor de 28500 kJ/kg, el valor obtenido se asemeja al obtenido de la pirólisis de madera. Debido al poder calorífico obtenido, el char obtenido podría utilizarse en horno como una fuente de energía térmica (Mazlan, Uemura, Osman, & Yusup, 2015).

El siguiente análisis realizado fue el análisis proximal del producto sólido. Tal como se observa en el Cuadro No. 8 en la sección de resultados, se obtuvo un porcentaje de humedad de $2.24 \pm 0.000012\%$, un porcentaje de cenizas de $10.50 \pm 0.000046\%$, un porcentaje de material volátil de $24.38 \pm 0.00011\%$ y un contenido de carbono fijo de $62.89 \pm 0.00012\%$. Se tiene que los resultados del análisis proximal corresponden a las propiedades deseadas en un carbón combustible, teniendo un contenido de humedad bajo, un porcentaje de cenizas y material volátil bajo y un alto contenido de carbono fijo, que corresponde a cantidad de carbono que se va a quemar en un estado sólido. Al realizar el análisis estadístico, tal como se observa en los Cuadros No. 87 a 90 en la sección de datos calculados, se obtuvo

un coeficiente de variación para el porcentaje de humedad del 80.87%, valor muy elevado, indicando la alta variabilidad entre las muestras. Esta variabilidad que existe entre las muestras, que si bien todos los porcentajes de humedad se encuentran por debajo del 5.00%, se debe al tiempo de almacenamiento y el estado de los mismos, ya que, a pesar de estar sellados, son propensos a adsorber humedad. Si bien son propensos a que su contenido de humedad aumente, el porcentaje que aumenta no es significativo como para que afecte el rendimiento del combustible. Posteriormente, para el porcentaje de cenizas se tiene un coeficiente de variación de 6.27%, porcentaje relativamente bajo indicando la poca variabilidad entre los datos obtenidos. Se obtuvo un coeficiente de variación del 12.83% para el porcentaje de material volátil y esta variación se debe a que al momento de realizar el análisis con el mismo lote de muestras utilizado para el análisis de la humedad se tiene implícitamente la variabilidad causada por la diferencia de humedades debido al tiempo y forma de almacenamiento del char. Finalmente se obtuvo un coeficiente de variación de 2.57% para el porcentaje de carbono fijo, el cual es bajo indicando que no hubo variabilidad significativa en los resultados.

Al comparar el análisis proximal realizado, se tiene que para la pirólisis de madera se tiene que el char posee un contenido de humedad del 2.9%, un porcentaje de cenizas de 3.0%, un porcentaje de material volátil de 42.5% y un porcentaje de carbono fijo de 51.6% (Mazlan, Uemura, Osman, & Yusup, 2015). Para la pirólisis de granos utilizados para la producción de cerveza, donde al realizar la pirólisis a 500°C se obtiene un rendimiento de char del 25.9% con un contenido de cenizas del 13.08%, un contenido de material volátil del 6.89% y un contenido fijo en carbonos del 80.03% (Olszewski, Arauzo, Maziarka, Ronsse, & Kruse, 2019). Para la pirólisis del tallo de maíz se tiene que el contenido de carbono fijo es de 56.5%, con un contenido de cenizas de 18.1% y un contenido de material volátil de 25.4% (Sun, He, Pan, & Zhang, 2016). Al comparar el análisis proximal realizado, se observa que el contenido de humedad del char se asemeja al contenido de humedad obtenido del proceso de pirólisis de madera, sin embargo, al comparar el porcentaje de cenizas, se observa la variabilidad entre los productos sólidos obtenidos para distintos tipos de biomasa. Esto se debe a que el contenido de cenizas depende primordialmente de la composición del char por medio de análisis elementales para cuantificar el porcentaje de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en la muestra. Dependiendo del porcentaje de carbono, será el porcentaje de cenizas del char. Se observa lo mismo para el contenido de carbono fijo en la muestra, dado que hay variabilidad en los valores mencionados para otros procesos de pirólisis. Esto se debe a que el contenido de carbono fijo varía de un char a otro por la composición del mismo y la temperatura a la cual se realizó el proceso de pirólisis. Ya que se logra un mayor porcentaje de carbono

fijo al aumentar la temperatura de pirólisis ya que se obtiene un mayor grado de carbonización (Sun, He, Pan, & Zhang, 2016).

Lo anterior mencionado se observa con el contenido de nitrógeno, se obtuvo un porcentaje de nitrógeno de $2.33 \pm 0.014\%$ en promedio, tal como se observa en el Cuadro No. 8 en la sección de resultados. Porcentaje relativamente bajo de nitrógeno dadas las condiciones de temperatura realizadas en la pirólisis para el reactor de 7.6 kg. Al realizar el análisis estadístico se obtuvo un coeficiente de variación de 1.48%, el cual es bajo y muestra la poca variabilidad entre los datos obtenidos. Para la pirólisis de madera a 650°C , se tiene un contenido de nitrógeno de 0.4%, el cual es un valor más pequeño al contenido de nitrógeno promedio obtenido. Lo anterior se debe a las variaciones en el proceso de pirólisis, tal como en el contenido de carbono fijo.

Tal como se observa en el Cuadro No. 8 en la sección de resultados, se determinó la densidad de bulto aireada, compacta y de trabajo del producto sólido. Los valores promedio obtenidos son de interés para el dimensionamiento de equipos de transporte mecánico de sólidos y para equipos de molienda por si se desea reducir aún el tamaño del char para su aplicación en hornos o por si se desea utilizar como adsorbente. Al realizar el análisis estadístico del material sólido se tiene un coeficiente de variación de 8.14% para la densidad de bulto aireada, 2.23% para la densidad de bulto compacta y 6.52% para la densidad de bulto de trabajo. Se observa que hay poca variabilidad entre los datos obtenidos para las tres densidades de bulto, tomando en cuenta que se realizó las mediciones a distintos tamaños de partícula.

Finalmente, para el análisis del producto sólido se realizó un análisis IR de la materia prima y del char obtenido del reactor de 7.6 kg para una corrida completa e incompleta. Tal como se observa en la Figura No. 26 en la sección de datos originales, se puede apreciar la desaparición de los picos característicos de los grupos funcionales de la materia prima según el grado de conversión en el proceso de pirólisis. Esto se aprecia en la Figura No. 27, donde la curva roja representa la corrida incompleta de pirólisis y la curva negra la pirólisis completa, donde se tiene prácticamente ningún grupo funcional detectable debido a que se carbonizó la muestra. Esto último se justifica con el análisis proximal realizado para el char. Identificando los picos correspondientes de la materia prima, se observa la presencia de alcoholes y fenoles para una asociación polimérica en el pico de 3274.08 cm^{-1} , característico del material polimérico de la materia prima siendo la lignina, celulosa y hemicelulosa. Se observa un pico de tensión de enlace carbono-hidrógeno (para un carbono terciario) en 2930.25 cm^{-1} ; se observa un pico de enlace carbono-hidrógeno (para carbono secundario y terciario) en 1362.28 cm^{-1} y 1443.72 cm^{-1} ; se observa un

pico de compuestos de nitrógeno insaturados, específicamente por vibraciones de tensión de cianuro (isocianuros) en 2162.33 cm^{-1} , pico correspondiente al cianuro presente en la semilla de aguacate. Se observa un pico de cromóforos carbonílicos, específicamente de aldehídos α , β , γ , δ insaturados alifáticos en 1635.10 cm^{-1} , presentes en la lignina y en la hemicelulosa de la materia prima. Se observa un pico de tensión de enlaces múltiples carbono-carbono, específicamente de aromático en 1542.09 cm^{-1} , correspondiente a los aromáticos presentes en la estructura de la lignina. Se observa un pico de grupos cromóforos misceláneos de vibraciones de torsión del O-H y tensión carbono-oxígeno para alcoholes primarios en 1002.91 cm^{-1} y finalmente, se observa un pico de alcoholes terciarios en 1150.57 cm^{-1} y 1362.28 cm^{-1} (Wade, 2012).

Para el producto líquido se determinó las propiedades fisicoquímicas que se pueden observar en el Cuadro No. 9 en la sección de resultados. Se realizó un análisis del poder calorífico en base húmeda del producto líquido, analizando por separado la fracción ligera y la fracción pesada. Se obtuvo un valor promedio de $1383.18 \pm 0.80\text{ kJ/kg}$ para la fracción ligera y $22759.56 \pm 10.24\text{ kJ/kg}$ para la fracción pesada. Se puede observar que el valor obtenido para la fracción ligera es muy bajo a comparación de la fracción pesada y eso se debe al alto contenido de humedad de la muestra, ya que el contenido de humedad reduce el poder calorífico de un combustible. Esto se mencionó previamente al realizar el proceso de pirólisis en el reactor de 7.6 kg, ya que se obtuvo un producto líquido, específicamente la fracción ligera, con una elevada cantidad de agua. Esto se puede apreciar al realizar el análisis estadístico, ya que se tiene un 43.79% de coeficiente de variación, indicando una alta variabilidad entre los datos medidos. Para reducir la variabilidad implica, tal como ya se ha mencionado anteriormente, implementar y realizar un sistema de deshidratación del producto líquido para reducir la humedad del mismo.

Por otra parte, si bien la fracción pesada posee un poder calorífico mucho mayor al de la fracción ligera, hay biomásas pirolizadas que proporcionan un mayor poder calorífico en la fracción líquida. Al comparar el valor de los residuos de madera de caoba, se observa que su poder calorífico es de 29520 kJ/kg , es significativamente mayor al obtenido. Esto puede deberse a que la fracción pesada contenga una fracción de humedad que reduzca el poder calorífico del mismo. No obstante, si se sigue comparando con otros valores presentados en la literatura, para el producto líquido de pirólisis de roble se tiene un poder calorífico de 17200 kJ/kg , valor que se aproxima al obtenido en la pirólisis de aguacate (Santos, 2021). Se puede entonces afirmar que el poder calorífico del producto líquido se encuentra entre el rango de los valores mencionados anteriormente. Tal como para la fracción ligera, al realizar el análisis estadístico se

determinó un coeficiente de variación de 30.06%, el cual indica la alta variabilidad en los datos debido a la presencia de agua en las muestras utilizadas.

Posteriormente, se obtuvo un valor de densidad del producto líquido promedio de 1693.49 ± 4.61 kg/m³ a una temperatura ambiente de 24°C. Se observa que el valor de la densidad es superior al del agua, debido a la mezcla de componentes complejos en el producto líquido. Al comparar los datos obtenidos con los reportados para los productos líquidos de pirólisis con otro tipo de biomasa se observa que se tiene una densidad mayor a las reportadas. Se tiene para la pirólisis de residuos de caoba una densidad de 950 kg/m³, una densidad para el producto de pirólisis de roble de 1240 kg/m³, si bien la densidad no se encuentra en el rango de los datos anteriormente mencionados, es bastante cercano (Santos, 2021). Por otra parte, al realizar el análisis estadístico se obtuvo un coeficiente de variación de 29.11%, lo cual indica una alta variabilidad en los datos medidos. Esto se debe a que al realizar las mediciones de densidad y se seleccionó la porción de muestra, esta poseía cantidades distintas de fracción pesada entre una muestra y otra. Para reducir dicha variabilidad se debe de analizar por separado las fracciones en base seca, determinar sus densidades para finalmente determinar la propiedad de mezcla por medio de las fracciones másicas.

Posteriormente, se realizó un análisis de la viscosidad del producto de pirólisis, tal como se observa en el cuadro no. 9 en la sección de resultados. Se obtuvo un valor promedio de la viscosidad dinámica de 11.43 ± 0.02 cP y un valor promedio de la viscosidad cinemática de 6.75 ± 0.01 cSt. Al realizar el análisis estadístico se puede observar que hubo un coeficiente de variación para ambos casos de 15.57%, lo cual es relativamente alto indicando variabilidad en la serie de datos. Esto se debe a que se realizó las mediciones de viscosidad a distintas temperaturas, lo que conlleva a una variación de la viscosidad. Al comparar con la pirólisis de otro tipo de biomásas, se tiene que la viscosidad cinemática obtenida se asemeja a la viscosidad cinemática del producto líquido de pirólisis de residuos de madera de caoba, siendo este de 4.6 cSt. Sin embargo, para otros tipos de biomasa se obtienen productos con mayor viscosidad, como el producto líquido de la pirólisis de roble, el cual posee un valor de 28 cSt (Santos, 2021). La variabilidad que existe entre una biomasa y otra es por la cantidad de fracción pesada obtenida en el proceso, lo cual conlleva a un aumento de la viscosidad dinámica y consecuentemente de la cinemática. Por otra parte, cabe mencionar que al realizar las mediciones de viscosidad el equipo no realizó adecuadamente las mediciones dado que, al colocar la muestra en el viscosímetro, esta poseía una lectura con un valor de porcentaje de torque del 10%. Para que el valor de la viscosidad sea confiable, debe encontrarse por encima del 10% de porcentaje de torque. Para obtener mediciones certeras de la

viscosidad del producto líquido es recomendable el uso de otro tipo de viscosímetro como el viscosímetro Ostwald.

Finalmente, se realizó un análisis de cromatografía de gases acoplado con masas, tal como se observa en el Cuadro No. 9 en la sección de resultados. Se realizó en un primer paso el análisis de la fracción líquida, obteniendo únicamente ácido acético, uno de los productos mayoritarios que se obtiene en la pirólisis de biomasa. Posteriormente, se analizó la fracción pesada, obteniendo principalmente furanos, como el 2-n-heptilfurano; alcoholes como el 4-metil-4-nonanol; cetonas como el 1-(3,4,5-trimetilfenil) etanona; ésteres como el metil eicosatetranoato y alcanos lineales como el eicosano. Se obtuvo una gran cantidad de compuestos con grupos funcionales orgánicos oxigenados, esto se debe a la oxidación que se dio del producto durante la pirólisis al no estar en un ambiente inerte libre de oxígeno. Por otra parte, los productos obtenidos concuerdan con los grupos funcionales listados en la literatura, ya que se tiene alta presencia de ésteres, alcoholes, ácidos carboxílicos y cetonas, los cuales se encuentran en una alta proporción para la pirólisis de aguacate (Durak & Aysu, 2014). Finalmente, los compuestos obtenidos de cadenas lineales de alcanos, siendo el heptacosano, eicosano y nonadecano, aportan buenas propiedades de octanaje al combustible líquido, por lo que, al realizar la deshidratación del producto, no sólo el poder calorífico aumentaría, sino que también las propiedades de detonación si se utilizara en un motor de combustión interna.

IX. CONCLUSIONES

- Se obtuvo una caracterización de la materia prima, obteniendo propiedades son fundamentales para el diseño de equipos de transporte mecánico de sólidos y para equipos de molienda. De la caracterización se tiene el porcentaje de humedad como la propiedad más determinante de las operaciones posteriores previo al proceso de pirólisis, con la cáscara siendo el mayor contribuyente de la humedad con un $77.01 \pm 0.25\%$.
- Se obtuvo de los procesos de secado realizados que el secado directo realiza la operación en un tiempo considerablemente menor al que se realizaría en el proceso de secado solar. Sin embargo, este presenta la desventaja que representa un alto consumo energético, lo que aumenta considerablemente los requerimientos energéticos de todos los procesos a realizar para la pirólisis de aguacate. Mientras que el secado solar al no consumir tanta energía requiere mayor tiempo para realizar el secado, lo que implica un avance en la oxidación y descomposición de la materia prima. Se determinó que la trituradora de residuos orgánicos es el equipo de reducción de tamaño con mayor eficacia y que este posee eficacias por encima del 90% tanto para materia prima seca como para materia prima sin secar. Lo que permite realizar inicialmente una reducción de tamaño y posteriormente un proceso de molienda sin tanta pérdida por acumulación dentro del equipo de molienda.
- Se determinó en el proceso de pirólisis con proporción de alimentación 50:50 para la cáscara y la semilla que los rendimientos de los tres productos son similares, con el producto sólido presentando el mayor rendimiento con $35.46 \pm 0.22\%$. Mientras que, con proporción de alimentación aleatoria o desconocida, los rendimientos presentan mayor variación teniendo en ambos reactores el producto líquido con mayor rendimiento, de $65.79 \pm 0.14\%$ para el reactor de 100 g y $73.28 \pm 0.31\%$ para el reactor de 7.6 kg. La temperatura fue la variable que más afectó al proceso en el reactor de 7.6 kg, por lo que se mezcló agua con producto líquido, razón por la cual se obtuvo un alto rendimiento. Finalmente, el proceso de pirólisis de residuos de aguacate no es rentable energéticamente debido a que se requiere una mayor cantidad de energía en el proceso de la que pueden otorgar los mismos al momento de someterlos a procesos de combustión.

- Se realizó la comparación de ambas escalas utilizadas para el proceso de pirólisis determinando como principal diferencia el modelo de transferencia de calor, teniendo que el calor se distribuye a lo largo de todo el reactor de 100 g mientras que en el reactor de 7.6 kg se recibe calor directamente en la parte inferior del mismo, ocasionando la evaporación por capas que afecta directamente al rendimiento del producto líquido.
- Al comparar los modelos cinéticos generados para ambos reactores se observa que para el reactor de 7.6 kg se obtuvo valores superiores en las constantes cinéticas para la energía de activación, la constante de frecuencia y el orden de reacción a comparación del reactor de 100 g. Las diferencias se tienen debido a las diferencias en los fenómenos de transporte en cada reactor, teniendo que se requiere mayor energía por unidad de masa en el reactor de 7.6 kg. Finalmente, el modelo de temperatura en función del tiempo no se adecua a los datos experimentales en el caso del reactor de 100 g dado que el sensor no se encuentra dentro del reactor, sin embargo, el decaimiento de masa en función del tiempo sí se adecua a los datos experimentales. En el caso del reactor de 7.6 kg, tanto la temperatura como el decaimiento de masa en función del tiempo se adecuan a los datos experimentales, dado que el sensor de temperatura se encuentra dentro del reactor.
- Al realizar el análisis fisicoquímico de los productos, se confirmó por medio de los análisis IR y de cromatografía de gases-masas que se realizó un proceso de pirólisis completo de los residuos de aguacate. Se obtuvo un carbón con alto porcentaje de carbono fijo que favorece sus procesos de combustión, además de un alto poder calorífico en base húmeda, que se asemeja al de otros combustibles sólidos. La alta presencia de agua en el producto líquido ocasionó una disminución de su poder calorífico, en cuanto a la fracción ligera, caso que no se obtuvo en la fracción pesada.

X. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis para la realización de un modelo de transferencia de calor del reactor dentro de la mufla para obtener valores de la temperatura dentro del reactor en función a la variación de masa dentro del reactor y el reflujo que se da en la chimenea de gases.
- Evaluar el uso de otros métodos para la determinación de la viscosidad del producto líquido de pirólisis con la finalidad de validar el método analítico realizado.
- Evaluar la realización del proceso de pirólisis de residuos de aguacate implementando catalizadores como el KOH o el Al_2O_3 y evaluar tanto los rendimientos obtenidos de cada producto, así como la composición del producto líquido.
- Evaluar el proceso de pirólisis de residuos de aguacate utilizando materia prima con distintos tamaños de partícula para determinar su efecto en los rendimientos del proceso.
- Realizar una deshidratación del producto líquido para determinar sus propiedades fisicoquímicas en base seca y evaluar su uso en motores de combustión interna o calderas.
- Evaluar las propiedades adsorbentes del producto sólido o char de la pirólisis de residuos de aguacate para su implementación en tratamiento de soluciones contaminadas por ejemplo.
- Evaluar la implementación de un sistema de captación del producto gaseoso en el reactor de pirólisis de 7.6 kg por medio del uso de un scrubber, almacenarlo en un cilindro de gas y analizarlo por medio de métodos cromatográficos para complementar los balances másicos y energéticos hechos.
- Realizar un proceso de secado de la materia prima molida obtenida luego del proceso de molienda para reducir el contenido de humedad del material a un porcentaje menor al 20%.
- Realizar un análisis del perfil de ácidos grasos de la semilla de aguacate para comparar con los valores reportados en la literatura y determinar su efecto en la composición final del producto líquido.

- Evaluar el proceso y los rendimientos de productos obtenidos en el proceso de pirólisis de aguacate realizando una pirólisis rápida aumentando la tasa de calentamiento a un valor de 5°C/min o 10°C/min.
- Complementar el análisis cinético hecho en base al cambio de masa en función del tiempo por medio de la realización de un análisis de la relación del rendimiento de cada producto de pirólisis en función de la temperatura máxima de operación de pirólisis.
- Realizar un análisis de las pérdidas térmicas en los dos sistemas de pirólisis para complementar los balances energéticos y proponer mejoras en los sistemas para aprovechar la energía proporcionada a los reactores.
- Evaluar la adición de un antioxidante al producto líquido, como el TBHQ (Terbutilhidroquinona) para evitar la continuación de la oxidación del producto durante su almacenamiento.
- Realizar el proceso para materiales con distinto grado de oxidación, es decir, una pirólisis con material relativamente fresco y una pirólisis con material con cierto grado de avance de descomposición.
- Realizar el proceso de pirólisis variando las proporciones de alimentación al reactor, conociendo la proporción de cáscara y semilla alimentada para determinar la variación en los rendimientos de los productos.
- Evaluar la implementación de un sistema de purga de oxígeno del reactor de 7.6 kg, utilizando nitrógeno por medio de válvulas de retención, para obtener un ambiente inerte que sea favorable para la composición de los productos de pirólisis.
- Realizar un análisis energético y de costos del proceso de secado para determinar el método más eficiente para realizar el secado de la materia prima y este utilizarlo para el proceso de pirólisis.
- Evaluar la composición y el análisis proximal del producto sólido al realizar el proceso de pirólisis a distintas temperaturas.
- Añadir un sistema de agitación en el reactor de 7.6 kg, como un agitador de ancla con los sellos mecánicos adecuados y a bajas revoluciones por minuto de modo que se pueda mejorar la transferencia de calor dentro del reactor.
- Realizar una destilación del producto líquido de pirólisis para realizar no solo la deshidratación, sino que también para separarlo en sus fracciones correspondientes para que se asemeje lo más posible a un combustible comercial.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- (ASTM), American Society for Testing and Materials. (1996). *Standard Test Method for Total Nitrogen in Organic Materials by Modified Kjeldahl Method*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM.
- (ASTM), American Society for Testing and Materials. (2002). *Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM.
- (ASTM), American Society for Testing and Materials. (2009). *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM.
- (ASTM), American Society for Testing and Materials. (2009). *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM International.
- Agexport. (2022). *Agexport Aguacate*. Obtenido de Agexport: <https://www.export.com.gt/publico/comite-de-aguacate>
- Ahmed, J., & Shafiur, M. (2007). *Handbook of Food Process Design*. Reino Unido: Wiley-Blackwell.
- Arteaga, J., Arenas, E., López, D., Sánchez, C., & Zapata, Z. (2012). *Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana (Elaeis guineensis Jacq.)*. Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Auris Retamozo, R. I., & Morales De La Cruz, F. K. (2019). *Evaluación de la influencia de la temperatura en el tiempo de producción de biogás de excretas de bovino en el centro poblado de Callqui Grande - Huancavelica*. Universidad Nacional de Huancavelica, Facultad de Ciencias de Ingeniería. Huancavelica, Perú: Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.
- Biofase. (2022). *Acerca de Biofase*. Obtenido de Biofase: <https://biofase.com.mx/acerca-de-nosotros>
- Bressani, R., Rodas, B., & de Ruiz, A. S. (2009). *La Composición Química, Capacidad Antioxidativa y Valor Nutritivo de la Semilla de Variedades de Aguacate*. Guatemala, Guatemala: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT), Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT), Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACYT), Universidad del Valle de Guatemala.
- Bressani, R., Rodas, B., & de Ruiz, A. S. (2009). *La Composición Química, Capacidad Antioxidativa y Valor Nutritivo de la Semilla de Variedades de Aguacate*. Guatemala: Consejo de Ciencia Nacional y Tecnología, Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología, Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología y Universidad del Valle de Guatemala.
- Campos, E., Ayala, J., Agustín, J., & de la Cruz, M. (2012). *Propagación de aguacate*. México: Universidad Autónoma Chapingo.

- Castells, X. (2012). *Biomasa y Bioenergía: Energía, Agua, Medioambiente, Territorialidad y Sostenibilidad*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Castells, X., & García, E. (2012). *La pirólisis, Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Castro, D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis aplicado al material lignocelulósico residual proveniente del Pino Patula en atmósfera de dióxido de carbono*. Bogotá, Colombia: Universidad Libre de Colombia.
- Di Blasi, C., Signorelli, G., Di Russo, C., & Rea, G. (1999). *Product Distribution from Pyrolysis of Wood and Agricultural Residues*. Nápoles, Italia: American Chemical Society.
- Dobele, G., Urbanovich, I., Volpert, A., Kampars, V., & Samulis, E. (2007). *Fast Pyrolysis - Effect of Wood Drying on the Yield and Properties of Bio-Oil*. Latvia: BioResources.
- Durak, H., & Aysu, T. (2014). *Effect of pyrolysis temperature and catalyst on production of bio-oil and bio-char from avocado seeds*. Turquía: Springer Science + Business Media Dordrecht.
- E. T. (2003). *Combustion Efficiency and Excess Air*. Obtenido de Engineering Toolbox: https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d_271.html
- Engineering ToolBox. (2017). *Combustion Heat*. Obtenido de Engineering ToolBox: https://www.engineeringtoolbox.com/standard-heat-of-combustion-energy-content-d_1987.html
- Fernández, A. (2020). *Análisis preliminar de modelos de pirólisis de biomasa para generación de combustibles a partir de residuos*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética.
- Fernández, J. (2008). *Poder calorífico*. Argentina: Universidad tecnológica nacional.
- Fernández, J., Gutierrez, F., Del Río, P., San Miguel, G., Bahillo, A., Sanchez, J., . . . Rodríguez, L. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Fischer-Kowalski, M., & Swilling, M. (2011). *Desacoplar el uso de los recursos naturales y los impactos ambientales de crecimiento económico*. Panel Internacional de Recursos, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). *Major Tropical Fruits, Market Review 2020*. Roma: FAO.
- García, M., del Mar, M., & Castro, E. (2020). *Avocado-Derived Biomass as a Source of Bioenergy and Bioproducts*. México: Applied Sciences, 10(22), 8195.

- GMI. (Septiembre de 2011). *Metano de Vertederos: Reducción de las Emisiones, Avance de las Oportunidades de Recuperación y Utilización*. Obtenido de Global Methane Initiative (GMI): https://www.globalmethane.org/documents/landfill_fs_spa.pdf
- Gobierno de España. (S.F.). *Valorización Energética/Tratamientos térmicos*. Obtenido de Vicepresidencia Tercera del Gobierno, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Pirolisis.aspx>
- Guerrero, R., Marrero, G., Martínez, J., & Puch, L. (2010). *Biocombustibles líquidos: Situación actual y oportunidades de futuro para España*. Madrid, España: Fundación IDEAS.
- Gupta, R., Adhikari, S., & Thangalazhy-Gopakumar, S. (2012). *Catalytic Pyrolysis of Biomass over H+ZSM-5 under Hydrogen Pressure*. Alabama, Estados Unidos: Energy & Fuels, ACS Publications.
- Gutiérrez, J. (2019). *Aprovechamiento de bioaceite pirolítico en motores a reacción, motores diesel, calderas y bioexplosivos*. España: Universidad de León.
- Hennessey Ramos, L. (2017). *Aprovechamiento de la Semilla de Aguacate Variedad Lorena como un Colorante Natural y del Aceite de Mesocarpios Residuales de la Variedad Hass como Componentes Funcionales en un Jabón Líquido*. Manizales, Colombia: Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas.
- INCAP. (2012). *Tabla de composición de alimentos de centroamérica*. Guatemala: Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP), Organización Panamericana de la Salud (OPS).
- Incyt. (2018). *Perfil energético de Guatemala*. Guatemala: Instituto de Investigación y Proyección sobre Ciencia y Tecnología (Incyt), VRIP.
- INE. (2020). *Guatemala: Estimaciones de la Población total por municipio, Período 2008-2020*. Guatemala: Instituto Nacional de Estadística.
- INE. (2020). *Hoja de balance de alimentos, HBA 2020*. Guatemala, Guatemala: Instituto Nacional de Estadística.
- Leite, A., Saucier, C., Lima, E., dos Reis, G., Umpierrez, C., Mello, B., . . . Sampaio, C. (2017). *Activated carbons from avocado seed: optimisation and application for removal of several emerging organic compounds*. Alemania: Environmental Science and Pollution Research.
- Levenspiel, O. (2004). *Ingeniería de las reacciones químicas*. Nueva York, Estados Unidos: Limusa Wiley.
- MARN. (2018). *Guía para la Identificación Gráfica de Residuos Sólidos Comunes*. Guatemala, Guatemala: Gobierno de Guatemala, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

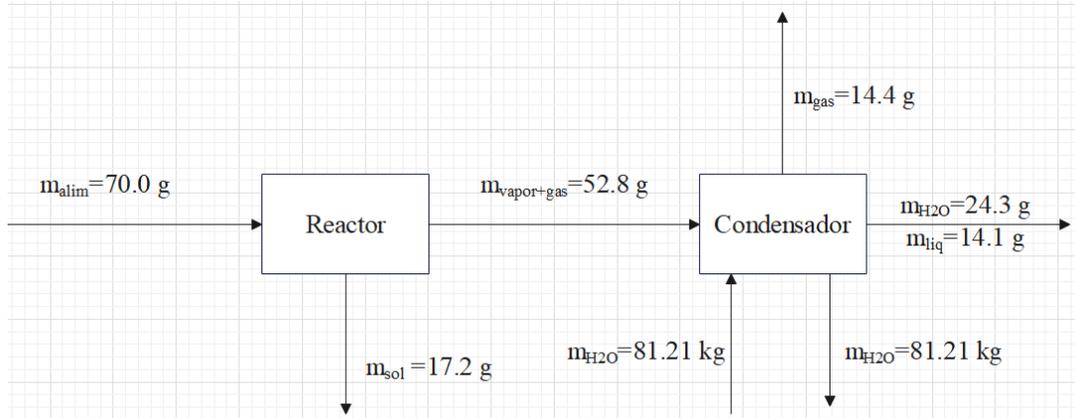
- Mazlan, M., Uemura, Y., Osman, N., & Yusup, S. (2015). *Characterization of Bio-char from Fast Pyrolysis of Meranti Wood Sawdust*. Malasia: Journal of Physics: Conference Series 622 (2015) 012054.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. México: McGraw-Hill.
- Ministerio de Economía de Guatemala. (2017). *Estudio de Mercado de Estados Unidos, Aguacate*. Guatemala: Ministerio de Economía, Viceministerio de integración y comercio exterior, dirección de análisis económico.
- Ministerio de Energía y Minas de Guatemala. (2017). *Informe Estadístico 2017 Dirección General de Energía*. Guatemala: Gobierno de Guatemala, Ministerio de Energía y Minas.
- Olszewski, M., Arauzo, P., Maziarka, P., Ronsse, F., & Kruse, A. (2019). *Pyrolysis Kinetics of Hydrochars Produced from Brewer's Spent Grains*. Stuttgart, Alemania: MDPI.
- Pretell Huamán, V. H. (2016). *Pirólisis rápida de biomasa de palma africana y caña de azúcar para la obtención de bio-petróleo*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Raja, P., & Barron, A. (2021). *Introduction to Elemental Analysis*. Texas, Estados Unidos: Rice University.
- Ribeiro, L., Oliveira, J., & Silva, J. (2018). *Chapter 1 - Introduction*. Brazil: Elsevier.
- Santos, V. (2021). *Advances in the Pyrolysis Process and the Generation of Bioenergy*. M. Bartoli, & M. Giorcelli (Eds.), Recent perspectives in Pyrolysis Research.
- Schaffer, S., Pröll, T., Al Afif, R., & Pfeifer, C. (2019). *A mass and energy balance based process modelling study for the pyrolysis of cotton stalks with char utilization for sustainable soil enhancement and carbon sotrage*. Vienna, Austria: Elsevier.
- Silva, M., Napoli, A., Trugilho, P., Abreu, Á., Mendoza, C., & Pereira, T. (2018). *Energy and mass balance in the pyrolysis process of Eucalyptus wood*. Brazil: Cerne.
- Skoog, D. (2015). *Fundamentos de Química Analítica, 9a ed*. México: Cengage Learning.
- Sun, J., He, F., Pan, Y., & Zhang, Z. (2016). *Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types*. China: Taylor & Francis Group.
- Tamayo, A., Cordoba, O., & Londoño, M. (2008). *Tecnología para el cultivo del aguacate*. Antioquia, Colombia: Corpoica.
- Treybal, R. (1988). *Operaciones de transferencia de masa*. México: McGraw-Hill.
- Van Nam, H., Quoc, D., Thanh, T., & Son, V. D. (2020). *Chemical composition of pyrolysis oil through thermal decomposition of sugarcane biomass*. Vietnam: Vietnam Academy of Science and Technology.

- Wade, L. (2012). *Química orgánica, Volumen 1, Séptima edición*. México: Editorial Pearson Education.
- Wauquier, J.-P. (2004). *El Refino del Petróleo: petróleo crudo, productos petrolíferos y esquemas de fabricación*. Paris, Francia: Editorial Díaz de Santos.
- Yarbay, R., Dolas, Y., Yargıç, A., & Özbay, N. (2020). *Experimental Study of Thermal Pyrolysis of Avocado Seed for Liquid Fuel production*. Turquía: Universidad Bilecik Seyh Edebali.
- Zúñiga Socop, M. M. (2021). *Aprovechamiento de los Residuos Sólidos de cáscara de Aguacate (Persea Americana) Variedad Hass para la Remoción del Cr (VI) acuoso*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, departamento de Ingeniería Química.

XII. ANEXOS

A. Balances de masa y energía

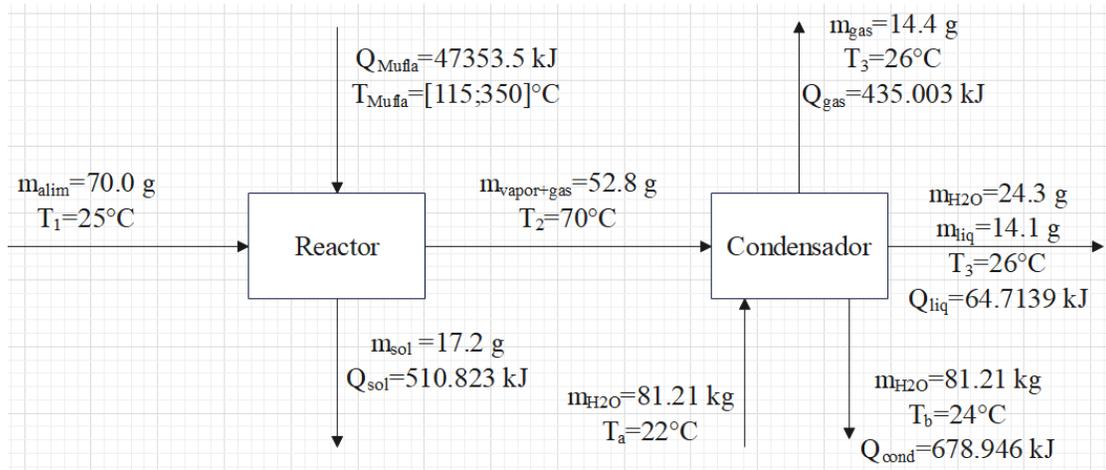
Figura No. 15 Balance de masa del reactor de pirólisis de 100 g.



(Fuente: propia)

- Se muestra el balance de masa del sistema de pirólisis para el reactor de 100g. El diagrama se realizó por medio del software Edraw Max.

Figura No. 16 Balance de energía del reactor de pirólisis de 100 g.

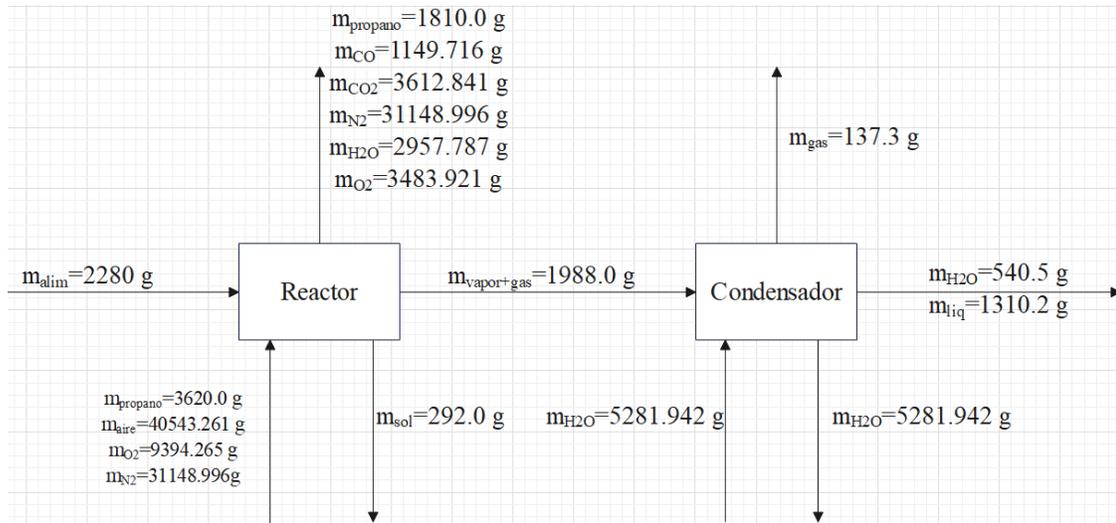


(Fuente: propia)

- Se muestra el balance de energía del sistema de pirólisis para el reactor de 100 g. Se determinó la energía proporcionada por la mufla a partir de la potencia del equipo; el calor removido por el condensador con base en la cantidad de agua utilizada y las temperaturas a la entrada y salida del mismo; y la energía de los productos de pirólisis se

obtuvo a partir de los poderes caloríficos de los mismos. El diagrama se realizó por medio del software Edraw Max.

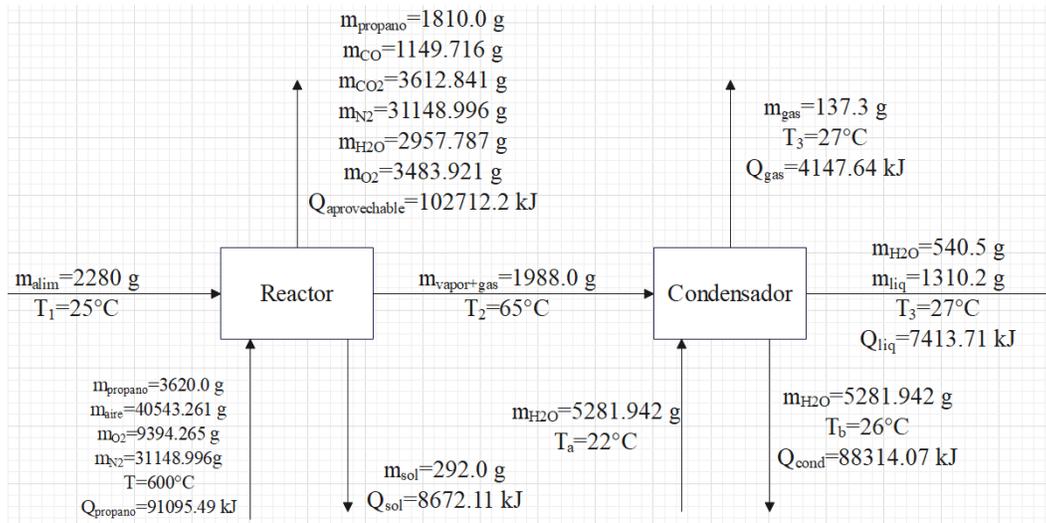
Figura No. 17 Balance de masa del reactor de pirólisis de 7.6 kg.



(Fuente: propia)

- Se muestra el balance de masa del reactor de pirólisis de 7.6 kg. Se realizó el balance de masa de la combustión tomando una combustión incompleta de propano. El diagrama se realizó por medio del software Edraw Max.

Figura No. 18 Balance de energía del reactor de pirólisis de 7.6 kg.



(Fuente: propia)

- Se muestra el balance de energía del sistema de pirólisis para el reactor de 7.6 kg. Se determinó la energía proporcionada por combustión a partir del poder calorífico del propano y la cantidad de combustible que reaccionó; el calor removido por el condensador en base a la cantidad de agua utilizada y las temperaturas a la entrada y salida del mismo; y la energía de los productos de pirólisis se obtuvo a partir de los poderes caloríficos de los mismos. El diagrama se realizó por medio del software Edraw Max.

B. Datos originales

Cuadro No. 10 Mediciones de bulto aireadas de la materia prima previo a la molienda

Corrida	Altura medida (cm) (± 0.005 cm)
1	14.0
2	13.0
3	16.0
4	14.0

- Se muestran los valores obtenidos para la densidad de bulto aireada de la materia prima utilizada, siendo la mezcla de cáscara de aguacate con semilla de aguacate. Se determinó el volumen midiendo la altura del recipiente y conociendo el diámetro para determinar dicho volumen y se dividió con la masa total de la materia prima de 1.8594 kg. El diámetro del recipiente utilizado fue de 33 cm.

Cuadro No. 11 Mediciones de densidades de bulto compactas de la materia prima

Corrida	Altura medida (m) (± 0.005 cm)
1	14.0
2	13.0
3	16.0
4	14.0

- Se muestran los valores obtenidos para la densidad de bulto compacta de la materia prima utilizada, siendo la mezcla de cáscara con semilla de aguacate. Se determinó el volumen midiendo la altura del recipiente y conociendo el diámetro para determinar dicho volumen y se dividió con la masa total de la materia prima de 1.8594 kg. El diámetro del recipiente utilizado fue de 33 cm.

Cuadro No. 12 Longitud de materia prima

Corrida	Longitud cáscara (cm) (\pm 0.005 cm)	Longitud semilla (cm) (\pm 0.005 cm)
1	34.5	82.7
2	35.3	76.3
3	34.2	79.6
4	37.2	83.4

- Se muestran las longitudes correspondientes de la materia prima, siendo esta la cáscara y la semilla. Se colocó diez unidades de cada material de forma consecutiva y se midió la longitud total de las diez unidades para determinar posteriormente el diámetro de partícula.

Cuadro No. 13 Masa individual de partícula

Corrida	Masa semilla (g) (\pm 0.1 g)	Masa cáscara (g) (\pm 0.1 g)
1	23.1	15.9
2	24.3	17.9
3	15.1	12.0
4	23.2	14.7
5	18.4	8.7
6	31.4	14.1
7	50.2	12.7
8	21.1	17.4
9	32.2	10.4
10	19.5	16.6

- Se muestra los datos de masa individual de la materia prima, siendo la cáscara y la semilla de aguacate. Para ello se utilizó una balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de medición de 0 a 2000 g y con incertidumbre de \pm 0.1 g.

Cuadro No. 14 Humedad de la cáscara de aguacate previo al proceso de secado

Corrida	Masa (g) (± 0.001 g)	Porcentaje de humedad (± 0.005 %)
1	0.547	78.88%
2	0.586	79.35%
3	0.583	77.02%
4	0.599	72.79%

- Se muestra la humedad de la cáscara de aguacate previo a la realización del proceso de secado. Para ello se utilizó una balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con un rango de medición de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.

Cuadro No. 15 Humedad de la semilla de aguacate previo al proceso de secado

Corrida	Masa (g) (± 0.001 g)	Porcentaje de humedad (± 0.005 %)
1	0.731	46.24%
2	1.081	51.06%
3	0.533	51.41%
4	0.995	40.30%

- Se muestra la humedad de la semilla de aguacate previo a la realización del proceso de secado. Para ello se utilizó una balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con un rango de medición de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.

Cuadro No. 16 Humedad de la cáscara de aguacate posterior al secado solar

Corrida	Masa (g) (± 0.001 g)	Porcentaje de humedad (± 0.005 %)
1	0.641	32.61%
2	0.596	35.23%
3	0.564	27.48%
4	0.517	34.62%

- Se muestra la humedad de la cáscara de aguacate posterior al proceso de secado solar. Se realizó el proceso de secado solar durante 5 días. Para ello se utilizó una balanza de humedad

Ohaus, modelo MB 120, con un rango de medición de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.

Cuadro No. 17 Humedad de la semilla de aguacate posterior al secado solar

Corrida	Masa (g) (± 0.001 g)	Porcentaje de humedad ($\pm 0.005\%$)
1	0.910	43.41%
2	1.332	35.14%
3	0.931	38.88%
4	0.887	47.01%

- Se muestra la humedad de la semilla de aguacate posterior al proceso de secado solar. Se realizó el proceso de secado durante 5 días. Para ello se utilizó una balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con un rango de medición de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.

Cuadro No. 18 Humedad de la cáscara de aguacate en el secado solar

Día	Muestra	Masa (g) (± 0.005 g)
1	1	12.67
	2	15.28
	3	8.63
	4	16.87
2	1	11.54
	2	14.24
	3	7.98
	4	15.42
3	1	9.45
	2	11.27
	3	5.8
	4	12.9
4	1	7.75
	2	9.98
	3	5.24
	4	10.85
5	1	7.42
	2	9.64
	3	5.13
	4	10.69

- Se muestran las mediciones de masa de las cuatro muestras de control durante el secado solar. Para cada día se midió la masa por medio de una balanza digital Nordika modelo EK3250-31P, con un rango de medición de 0 a 5 kg y una incertidumbre de ± 0.005 g.

Cuadro No. 19 Humedad de la cáscara de aguacate en el secado con horno deshidratador

Tiempo (min)	Muestra	Masa (g) (± 0.001 g)	Porcentaje de humedad ($\pm 0.005\%$)
0	1	0.6212	77.45%
	2	0.5844	78.34%
	3	0.5947	79.01%
	4	0.6041	75.67%
30	1	0.4658	52.43%
	2	0.4175	-
	3	0.4516	-
	4	0.5001	-
60	1	0.3605	-
	2	0.3437	-
	3	0.3213	-
	4	0.3364	-

- Se muestra las masas obtenidas para la humedad de la cáscara de aguacate en el proceso de secado por medio de un horno deshidratador. Para ello se utilizó el horno deshidratador de bandejas del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Se tomó cuatro muestras de control a las cuales se les midió su masa cada 30 minutos y se mantuvo una temperatura dentro del horno de 67°C , para ello se utilizó una balanza analítica Ohaus, Pioneer Series, modelo PA114, con un rango de medición de 0 a 110 g y una incertidumbre de 0.0001 g.

Cuadro No. 20 Humedad de la semilla de aguacate en el secado con horno deshidratador

Tiempo (min)	Muestra	Masa (g) (± 0.001 g)	Porcentaje de humedad ($\pm 0.005\%$)
0	1	0.8533	48.27%
	2	0.9424	52.07%
	3	0.6720	50.86%
	4	1.0458	47.39%
30	1	0.7592	-
	2	0.7980	-
	3	0.5654	-
	4	0.9717	-
60	1	0.7081	-
	2	0.7418	-
	3	0.5457	-
	4	0.8756	-

- Se muestra las masas obtenidas para la humedad de la semilla de aguacate en el proceso de secado por medio de un horno deshidratador. Para ello se utilizó el horno deshidratador de bandejas del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Se tomó cuatro muestras de control a las cuales se les midió su masa cada 30 minutos y se mantuvo una temperatura dentro del horno de 67°C , para ello se utilizó una balanza analítica Ohaus, Pioneer Series, modelo PA114, con un rango de medición de 0 a 110 g y una incertidumbre de 0.0001 g.

Cuadro No. 21 Reducción de tamaño en molino de discos y la trituradora de cuchillas

Equipo de reducción de tamaño	Masa de alimentación	Masa de material molido
Discos	340 ± 10 g	320 ± 10 g
Cuchillas (Materia prima sin secar)	7.92 ± 0.01 kg	7.32 ± 0.01 kg
Cuchillas (Materia prima seca)	4.28 ± 0.01 kg	4.11 ± 0.01 kg

- Se muestra los datos de balance de masa para el proceso de reducción de tamaño de la materia prima. Se muestran las masas de alimentación y de material molido para ambos

equipos de reducción de tamaño. Se utilizó el molino de discos del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle Guatemala y se utilizó una trituradora de residuos orgánicos marca Trapp, modelo TR200.

Cuadro No. 22 Datos de análisis granulométrico del molino de discos

Malla Tyler	Malla Mesh	Masa (kg)	Tamaño de partícula (μm)	Tamaño de partícula (mm)
20	20	0.27 ± 0.05	850	0.850
30	28	0.02 ± 0.05	600	0.600
45	42	0.02 ± 0.05	355	0.355
60	60	0.004 ± 0.0001	250	0.250
80	80	0.006 ± 0.0001	180	0.180
100	100	0.00	150	0.150
>100	>100	0.00	<150	<0.15

- Se muestran los datos obtenidos para el análisis granulométrico para el molino de discos. Para ello se utilizó una tamizadora ROTAP modelo RX-29 con las mallas Tyler y Mesh mostradas en las primeras dos columnas del cuadro. Las masas de cada malla se midieron por medio de una balanza Mettler Toledo modelo BBA231, con un rango de medición de 0 a 100 kg y una incertidumbre de 0.05 kg.

Cuadro No. 23 Datos de análisis granulométrico de la trituradora de cuchillas

Malla Tyler	Malla Mesh	Masa (kg)	Tamaño de partícula (μm)	Tamaño de partícula (mm)
20	20	1.17 ± 0.05	850	0.850
30	28	0.09 ± 0.05	600	0.600
45	42	0.07 ± 0.05	355	0.355
60	60	0.012 ± 0.0001	250	0.250
80	80	0.008 ± 0.0001	180	0.180
100	100	0.00	150	0.150
>100	>100	0.00	<150	<0.150

- Se muestran los datos obtenidos para el análisis granulométrico para la trituradora de cuchillas. Para ello se utilizó una tamizadora ROTAP modelo RX-29 con las mallas Tyler y Mesh mostradas en las primeras dos columnas del cuadro. Las masas de cada malla se midieron por medio de una balanza Mettler Toledo modelo BBA231, con un rango de medición de 0 a 100 kg y una incertidumbre de 0.05 kg.

Cuadro No. 24 Humedad de material molido

Corrida	Masa (g) (± 0.001 g)	Porcentaje de humedad ($\pm 0.005\%$)
1	0.713	46.28%
2	0.545	47.71%
3	0.636	48.90%
4	0.637	48.51%

- Se muestra el porcentaje de humedad de la materia prima molida. Para ello se utilizó una balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con un rango de medición de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.

Cuadro No. 25 Datos de densidad de bulto aireada del material molido

Corrida	Masa (g) (± 0.1 g)	Volumen (mL) (± 0.5 mL)
1	10.9	26.0
2	11.8	31.0
3	12.4	34.0
4	11.3	29.0

- Se muestran los datos obtenidos para la medición de la densidad de bulto aireada de la materia prima molida. Se colocó material en una probeta KIMAX de 50 mL y se midió la masa por medio de una balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de 0.1 g.

Cuadro No. 26 Datos de densidad de bulto compacta del material molido

Corrida	Masa (g) (± 0.1 g)	Volumen (mL) (± 0.5 mL)
1	10.9	23.0
2	11.8	27.0
3	12.4	26.0
4	11.3	24.0

- Se muestran los datos obtenidos para la medición de la densidad de bulto compacta de la materia prima molida. Se colocó material en una probeta KIMAX de 50 mL y se midió la masa por medio de una balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de 0.1 g.

Cuadro No. 27 Masas del proceso de pirólisis en el reactor de 100 g en proporción 50:50 (cáscara:semilla)

Corrida	Masa inicial (g) (± 0.1 g)	Masa de producto sólido (g) (± 0.1 g)	Masa de producto líquido (g) (± 0.1 g)	Masa de agua (g) (± 0.1 g)
1	40.0	8.7	8.5	14.3
2	60.0	12.6	12.7	21.5
3	70.0	16.4	14.0	25.5
4	70.0	17.2	14.1	24.3
5	70.0	16.2	13.5	25.3

- Se muestran las masas tanto de materia prima como la de los productos obtenidos del proceso de pirólisis para una alimentación en proporción 50:50 de cáscara y semilla de aguacate. Se realizó la pirólisis en el reactor de 100 g del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, un sistema de condensación para la condensación de los gases provenientes del reactor y un horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010, con un rango de temperatura de 25 a 1200°C.

Cuadro No. 28 Masas del proceso de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación en proporción aleatoria

Corrida	Masa inicial (g) (\pm 0.1 g)	Masa producto sólido (g) (\pm 0.1 g)	Masa producto líquido (g) (\pm 0.1 g)	Masa de agua (g) (\pm 0.1 g)
1	70.0	11.7	32.4	20.7
2	70.0	10.4	29.6	22.4
3	70.0	8.8	34.6	20.2

- Se muestran las masas tanto de materia prima como la de los productos obtenidos del proceso de pirólisis para una alimentación aleatoria. Se realizó la pirólisis en el reactor de 100 g del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, un sistema de condensación para la condensación de los gases provenientes del reactor y un horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010, con un rango de temperatura de 25 a 1200°C.

Cuadro No. 29 Masas del proceso incompleto de pirólisis en el reactor de 7.6 kg con alimentación en proporción aleatoria

Corrida	Masa inicial (g) (\pm 10 g)	Masa producto sólido (g) (\pm 10 g)	Masa producto líquido (g) (\pm 10 g)	Masa de agua (g) (\pm 10 g)
1	2420	584.1	992.7	660.2
2	2380	658.9	972.9	558.2

- Se muestran las masas tanto de materia prima como la de los productos obtenidos del proceso incompleto de pirólisis para una alimentación aleatoria. Se realizó la pirólisis en el sistema de 7.6 kg del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro No. 30 Masas del proceso completo de pirólisis en el reactor de 7.6 kg con alimentación en proporción aleatoria

Corrida	Masa inicial (g) (\pm 10 g)	Masa producto sólido (g) (\pm 10 g)	Masa producto líquido (g) (\pm 10 g)	Masa de agua (g) (\pm 10 g)
1	2300	391.4	1444.6	319.6
2	2240	294.6	1378.5	314.0
3	2280	292.0	1310.2	540.5

- Se muestran las masas tanto de materia prima como la de los productos obtenidos del proceso completo de pirólisis para una alimentación aleatoria. Se realizó la pirólisis en el sistema de 7.6 kg del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Cuadro No. 31 Datos para el análisis cinético en el reactor de 100 g

Tiempo (min)	Temperatura (°C) (\pm 0.5°C)	Masa de agua (g) (\pm 0.1 g)	Masa de producto líquido (g) (\pm 0.1 g)
0	23.0	0.00	0.0
5	79.0	0.00	0.0
10	106.0	0.00	0.0
15	118.0	0.00	0.0
20	136.0	0.00	0.0
25	156.0	0.00	0.0
30	165.0	0.00	0.0
35	164.0	0.00	0.0
40	165.0	0.00	0.0
45	165.0	1.30	0.0
50	165.0	1.30	0.0
55	165.0	1.40	0.0
60	165.0	1.50	0.0
65	165.0	2.30	0.0
70	188.0	1.60	0.0
75	205.0	2.00	0.0
80	204.0	2.10	0.0
85	202.0	2.00	0.0
90	199.0	2.00	0.0
95	200.0	1.90	0.0
100	200.0	1.70	0.0
105	204.0	0.00	1.6
110	218.0	0.00	1.9
115	218.0	0.00	1.8
120	216.0	0.00	1.7

Tiempo (min)	Temperatura (°C) (\pm 0.5°C)	Masa de agua (g) (\pm 0.1 g)	Masa de producto líquido (g) (\pm 0.1 g)
125	215.0	0.00	1.6
130	220.0	0.00	1.5
135	233.0	0.00	1.6
140	232.0	0.00	1.6
145	230.0	0.00	1.2
150	245.0	0.00	1.3
155	254.0	0.00	1.5
160	251.0	0.00	1.4
165	260.0	0.00	1.1
170	277.0	0.00	1.2
175	280.0	0.00	1.2
180	277.0	0.00	1.6
185	275.0	0.00	1.4
190	275.0	0.00	1.0
195	275.0	0.00	1.0
200	277.0	0.00	0.9
205	297.0	0.00	0.9
210	298.0	0.00	1.3
215	296.0	0.00	0.8
220	295.0	0.00	0.2
225	312.0	0.00	0.1
230	322.0	0.00	0.1
240	328.0	0.00	0.1
245	336.0	0.00	0.2
250	335.0	0.00	0.2
255	335.0	0.00	0.1

- Se muestran los datos obtenidos para la realización del análisis cinético del reactor de 100 g. Se midió la temperatura y el producto obtenido cada 5 minutos hasta completar el proceso de pirólisis. Para ello se utilizó el reactor de pirólisis de 100 g del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, un horno mufla Thermo Scientific,

Thermolyne, modelo F6010, con un rango de temperatura de 25 a 1200°C y se utilizó una balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de 0.1 g.

Cuadro No. 32 Datos para el análisis cinético en el reactor de 7.6 kg

Tiempo (min)	Temperatura (°C) (± °C)	Masa de agua (g) (± 0.1 g)	Masa de producto líquido (g) (± 0.1 g)
0	22.0	0.0	0.0
5	24.0	0.0	0.0
10	29.0	0.0	0.0
15	54.0	0.0	0.0
20	73.0	0.0	0.0
25	92.0	0.0	0.0
30	107.0	0.0	0.0
35	121.0	0.0	0.0
40	125.0	3.9	0.0
45	127.0	12.4	0.0
50	129.0	20.8	0.0
55	131.0	28.5	0.0
60	132.0	22.3	0.0
65	133.0	26.4	0.0
70	134.0	25.9	0.0
75	135.0	22.6	0.0
80	136.0	24.4	0.0
85	137.0	22.7	0.0
90	138.0	21.3	0.0
95	139.0	22.3	0.0
100	139.0	19.5	0.0
105	140.0	21.9	0.0
110	140.0	19.0	0.0
115	141.0	21.2	0.0
120	141.0	17.9	0.0
125	141.0	17.6	0.0

Tiempo (min)	Temperatura (°C) (± °C)	Masa de agua (g) (± 0.1 g)	Masa de producto líquido (g) (± 0.1 g)
130	142.0	18.7	0.0
135	146.0	19.6	0.0
140	149.0	21.1	0.0
145	152.0	22.6	0.0
150	155.0	20.6	0.0
155	157.0	20.0	0.0
160	161.0	29.5	0.0
165	163.0	17.8	0.0
170	163.0	0.0	17.1
175	165.0	0.0	20.8
180	166.0	0.0	20.6
185	168.0	0.0	18.7
190	168.0	0.0	19.7
195	169.0	0.0	25.3
200	170.0	0.0	19.1
205	170.0	0.0	16.7
210	170.0	0.0	17.6
215	171.0	0.0	14.8
220	171.0	0.0	16.8
225	171.0	0.0	16.3
230	179.0	0.0	29.9
235	190.0	0.0	25.9
240	219.0	0.0	59.2
245	241.0	0.0	44.2
250	250.0	0.0	42.3
255	256.0	0.0	33.8
260	259.0	0.0	32.6
265	263.0	0.0	35.7
270	266.0	0.0	29.8
275	268.0	0.0	28.0

Tiempo (min)	Temperatura (°C) (± °C)	Masa de agua (g) (± 0.1 g)	Masa de producto líquido (g) (± 0.1 g)
280	271.0	0.0	31.0
285	272.0	0.0	33.2
290	274.0	0.0	23.0
295	275.0	0.0	27.9
300	277.0	0.0	26.9
305	278.0	0.0	25.0
310	279.0	0.0	27.7
315	280.0	0.0	22.1
320	280.0	0.0	43.4
325	281.0	0.0	23.9
330	282.0	0.0	33.7
335	282.0	0.0	23.3
340	283.0	0.0	24.6
345	284.0	0.0	17.9
350	285.0	0.0	22.4
355	284.0	0.0	21.2
360	285.0	0.0	24.3
365	288.0	0.0	24.2
370	301.0	0.0	17.8
375	313.0	0.0	24.8
380	323.0	0.0	23.9
385	328.0	0.0	18.4
390	333.0	0.0	19.8
395	336.0	0.0	13.2
400	340.0	0.0	14.6
405	344.0	0.0	11.7
410	345.0	0.0	11.9
415	346.0	0.0	10.8
420	346.0	0.0	10.9
425	347.0	0.0	7.5

Tiempo (min)	Temperatura (°C) (± °C)	Masa de agua (g) (± 0.1 g)	Masa de producto líquido (g) (± 0.1 g)
430	346.0	0.0	8.4
435	347.0	0.0	7.1
440	346.0	0.0	6.6
445	346.0	0.0	5.9
450	344.0	0.0	5.3
455	346.0	0.0	5.1
460	352.0	0.0	4.5
465	355.0	0.0	4.6
470	360.0	0.0	4.0
485	362.0	0.0	3.4
490	363.0	0.0	2.6
495	363.0	0.0	2.5

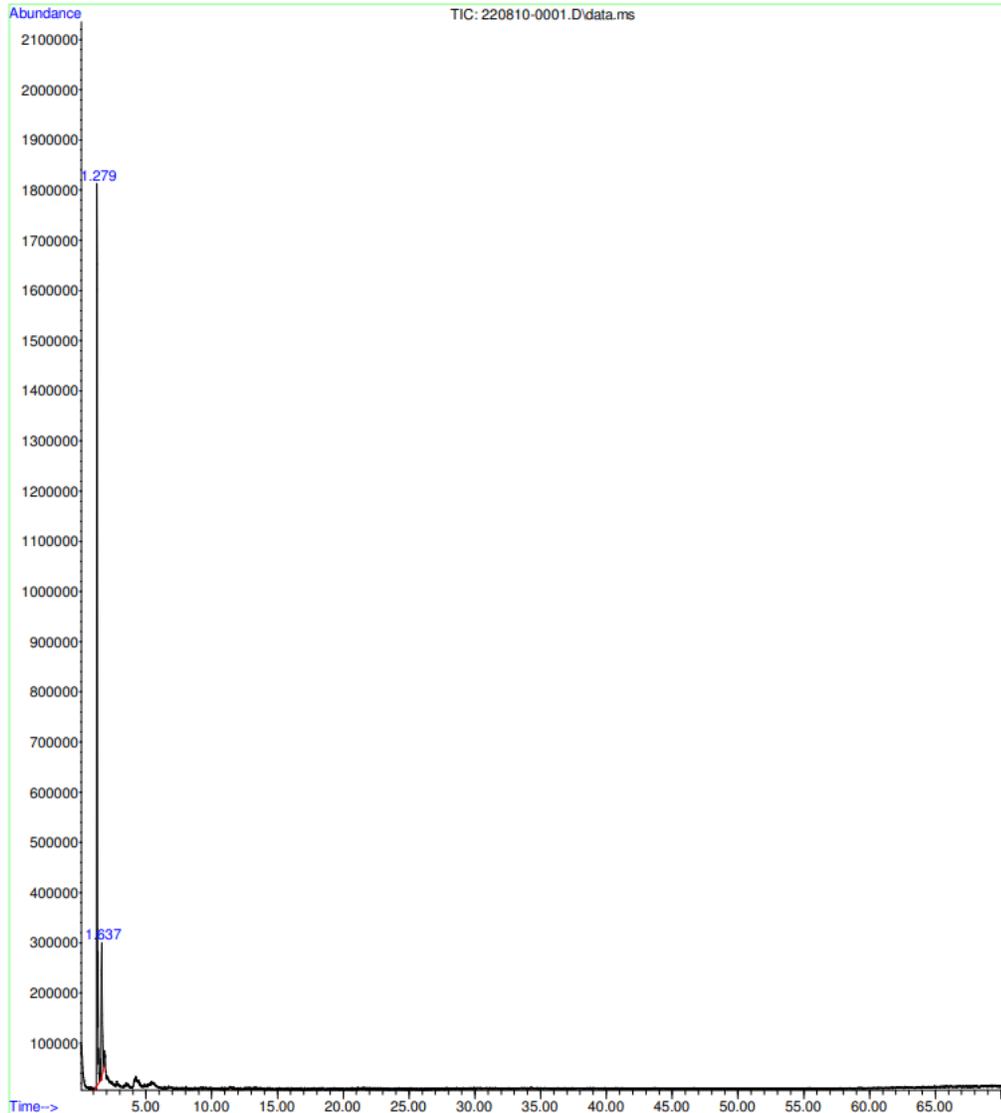
- Se muestran los datos obtenidos para la realización del análisis cinético del sistema de pirólisis de 7.6 kg. Se midió la temperatura y las masas obtenidas del sistema cada 5 minutos hasta completar el proceso de pirólisis. Para ello se utilizó el sistema de pirólisis de 7.6 kg del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala y una balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de 0.1 g.

Cuadro No. 33 Análisis de cromatografía de gases-masas de la fracción ligera del producto líquido de pirólisis

Corrida	Pico	Tiempo de retención (min)	Porcentaje de área bajo la curva (%)	Compuesto
1	1	1.279	83.98	Agua
	2	1.638	16.02	Ácido acético
2	1	1.306	82.40	Agua
	2	1.657	17.60	Ácido acético
3	1	1.288	85.20	Agua
	2	1.647	14.80	Ácido acético

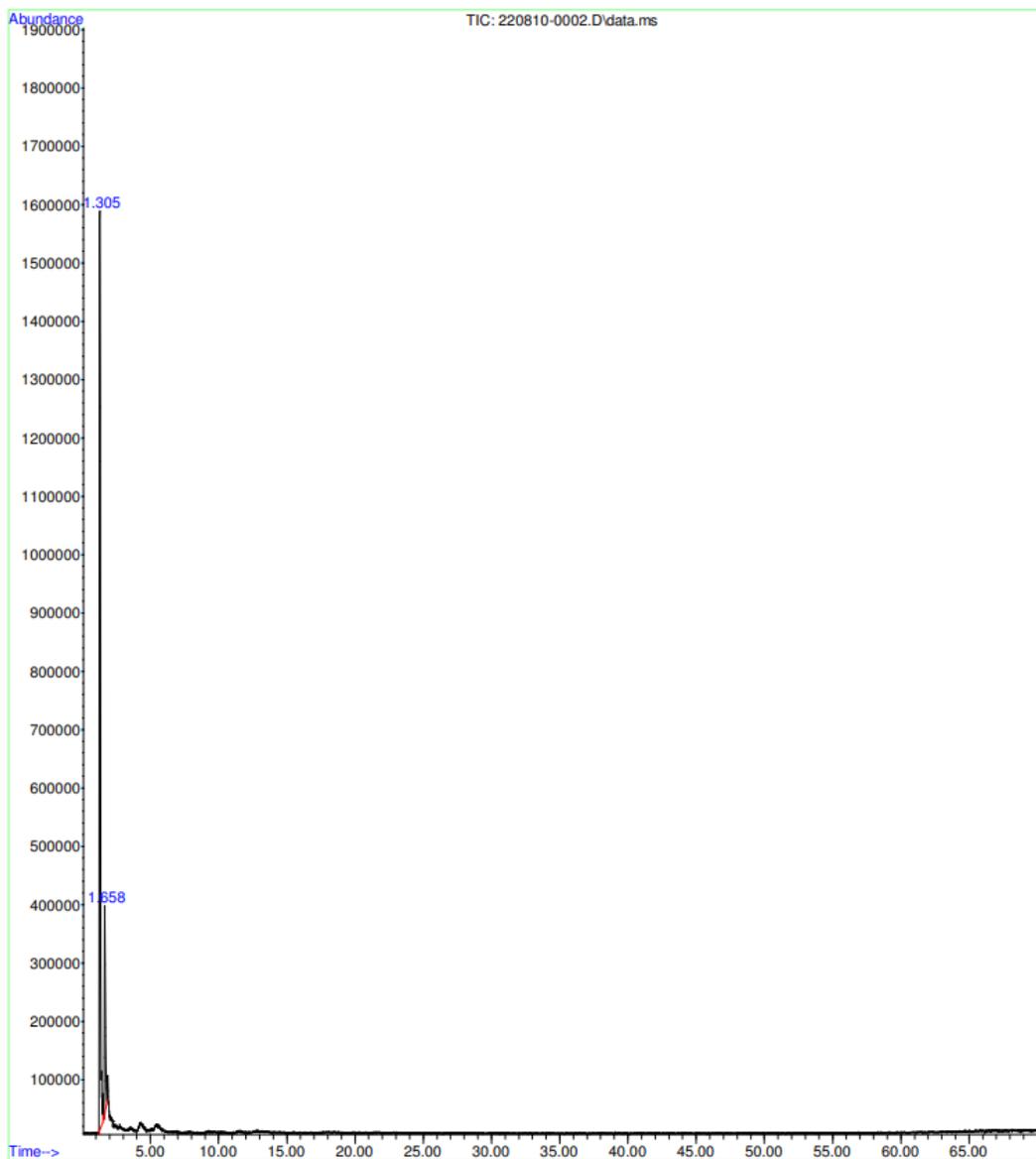
- Se muestra los análisis de cromatografía de gases-masas de la fracción ligera del producto de pirólisis. Se muestra los tiempos de retención y la abundancia de cada compuesto en todas las muestras.

Figura No. 19 Cromatograma de la primera muestra de la fracción ligera del producto líquido de pirólisis



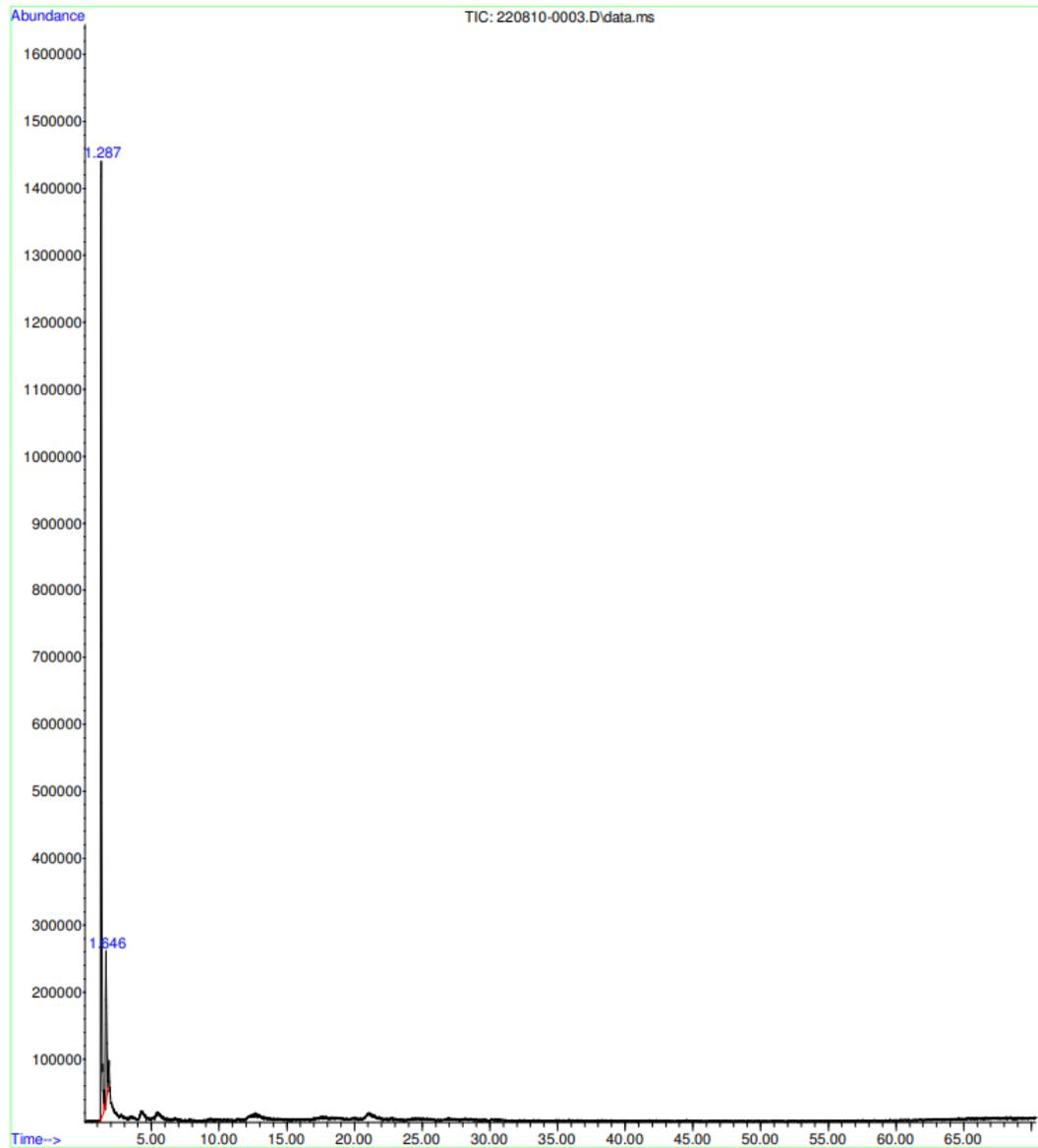
- Se muestra el cromatograma obtenido para la primera muestra de la fracción ligera del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

Figura No. 20 Cromatograma de la segunda muestra de la fracción ligera del producto líquido de pirólisis



- Se muestra el cromatograma obtenido para la segunda muestra de la fracción ligera del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

Figura No. 21 Cromatograma de la tercera muestra de la fracción ligera del producto líquido de pirólisis



- Se muestra el cromatograma obtenido para la tercera muestra de la fracción ligera del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

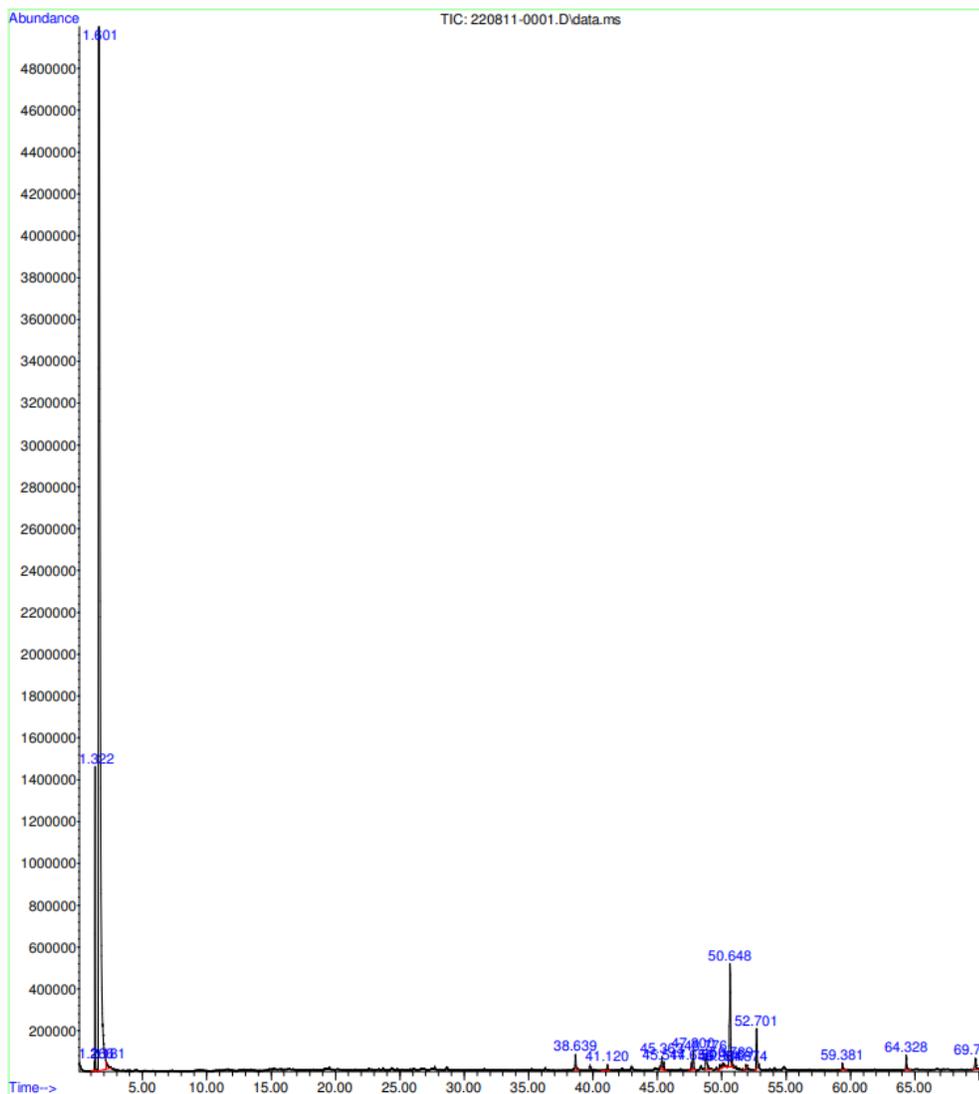
Cuadro No. 34 Análisis de cromatografía de gases-masas de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis

Muestra	Pico	Tiempo de retención (min)	Porcentaje de área bajo la curva (%)	Compuesto	Porcentaje de semejanza con base de datos (%)
1	1	1.266	0.09	Agua	-
	2	1.320	2.47	Alcohol etílico	-
	3	1.602	87.39	Triclorometano	-
	4	2.180	0.41	Triclorometano	-
	5	38.637	0.48	2-n-heptilfurano	71.4
	6	41.121	0.17	2-isoamilpirazina	63.7
	7	45.365	0.45	4-metil-4-nonanol	74.1
	8	45.515	0.23	2-n-octilfurano	74.9
	9	47.657	0.24	1-(3,4,5-trimetilfenil) etanona	79.1
	10	47.798	0.53	6- ácido octenoico, 3, 7 - dimetil	76.4
	11	48.776	0.87	3-hexanol, 2,3-dimetil-	63.4
	12	49.863	0.20	2,2-dimetil-5-hexen-3-ol	65.7
	13	50.118	0.24	Oxaciclotridecan-2-ona	78.2
	14	50.650	3.57	Metil (Z) – 5, 11, 14, 17 – eicosatetraenoato	73.4
	15	50.787	0.22	9, 12, 15 – ácido octadecatrienoico metilester, (Z,Z,Z) -	70.5
	16	51.874	0.05	11- decenol	72.1
	17	52.702	1.14	2, 6, 11-trimetil dodecano	78.4
	18	59.379	0.25	Nonadecano	88.2
	19	64.328	0.51	Eicosano	88.1
	20	69.736	0.50	Heptacosano	85.6

Muestra	Pico	Tiempo de retención (min)	Porcentaje de área bajo la curva (%)	Compuesto	Porcentaje de semejanza con base de datos (%)
2	1	1.265	0.16	Agua	-
	2	1.324	2.80	Alcohol etílico	-
	3	1.597	92.31	Triclorometano	-
	4	38.637	0.33	2-n-heptilfurano	72.4
	5	47.798	0.35	2-isoamilpirazina	64.5
	6	48.799	0.40	3-hexanol, 2,3-dimetil-	63.4
	7	50.627	2.14	Metil (Z) – 5, 11, 14, 17 – eicosatetraenoato	75.8
	8	52.701	0.74	2, 6, 11-trimetil dodecano	77.6
	9	64.323	0.37	Nonadecano	89.8
	10	69.704	0.39	Eicosano	84.8

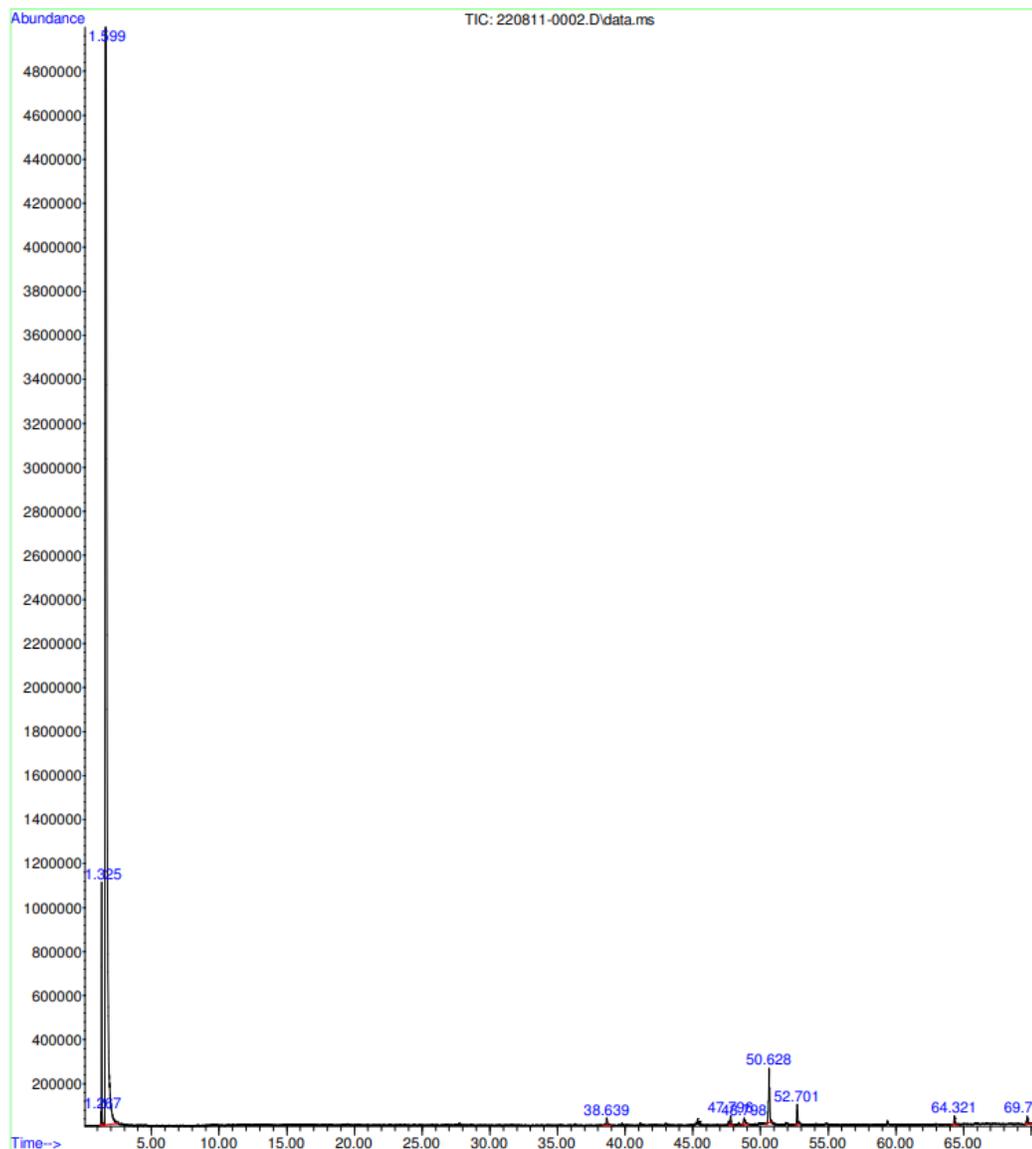
- Se muestra los análisis de cromatografía de gases-masas de la fracción pesada del producto líquido del proceso de pirólisis. Se muestra el tiempo de retención y la abundancia de cada uno de los compuestos, además del porcentaje de semejanza de cada uno con respecto a la base de datos.

Figura No. 22 Cromatograma de la primera muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis



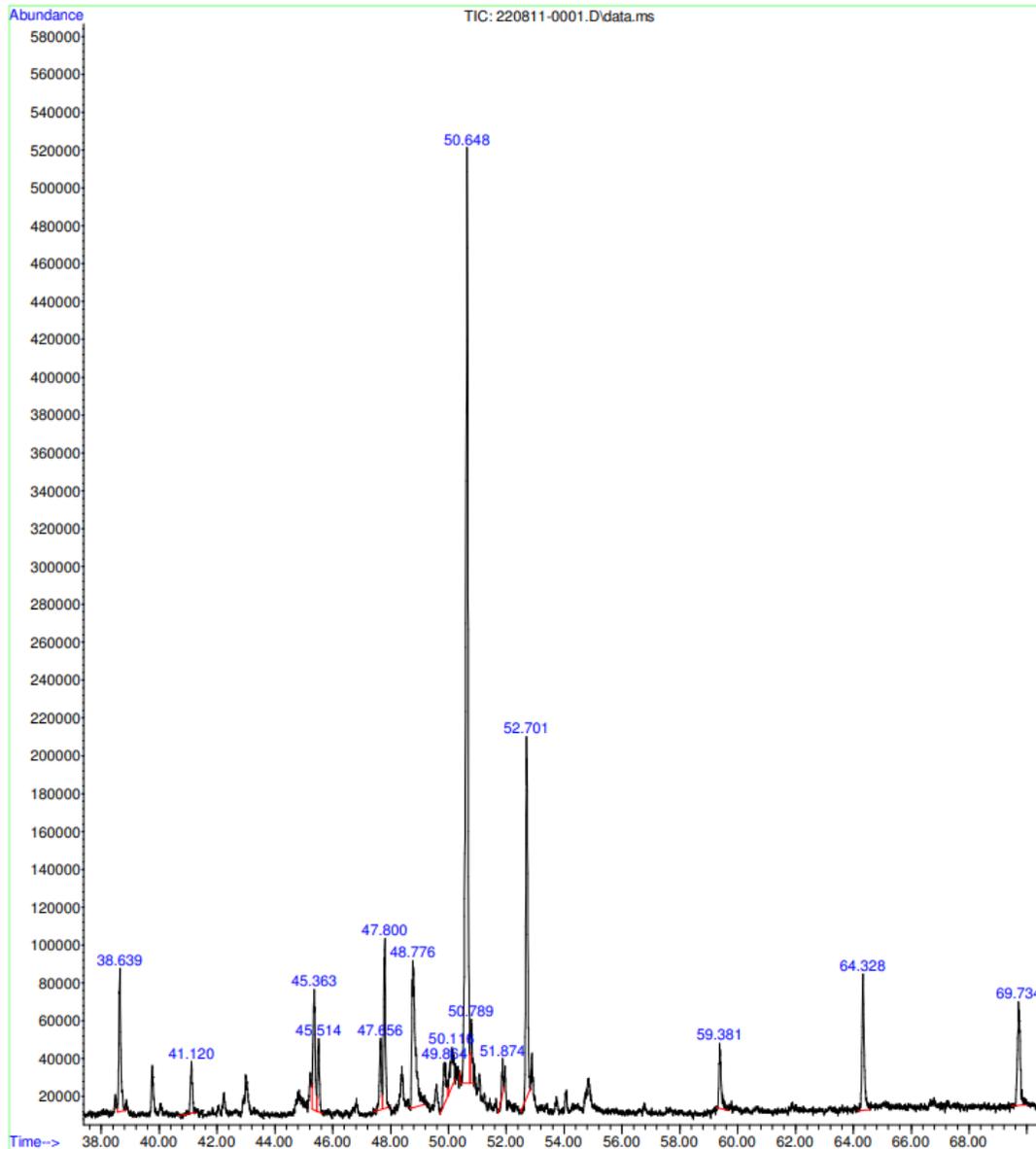
- Se muestra el cromatograma obtenido para la primera muestra de la fracción pesada del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

Figura No. 23 Cromatograma de la segunda muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis



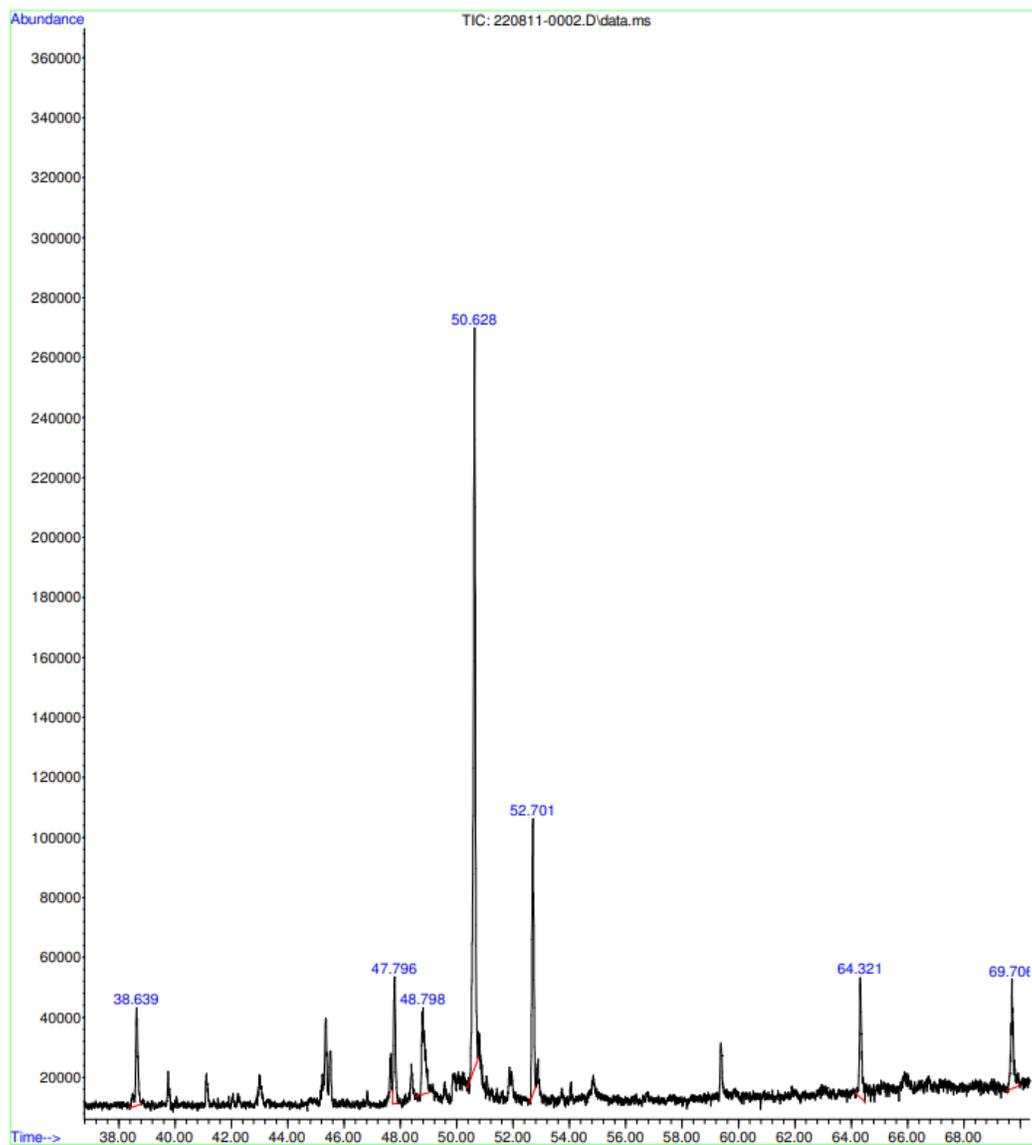
- Se muestra el cromatograma obtenido para la segunda muestra de la fracción pesada del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

Figura No. 24 Cromatograma de la primera muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis, espectro ampliado



- Se muestra el cromatograma obtenido para la primera muestra de la fracción pesada del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

Figura No. 25 Cromatograma de la segunda muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis, espectro ampliado



- Se muestra el cromatograma obtenido para la segunda muestra de la fracción pesada del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis. En el eje Y se tiene la abundancia y en el eje X se tiene el tiempo en minutos.

Cuadro No. 35 Datos de poder calorífico en base húmeda del producto sólido de pirólisis

Corrida	Masa (g) (± 0.0001 g)	Poder calorífico en base húmeda (± 0.05)
Calibración	0.5017	10,209 J/K
1	0.2128	17,944 J/g
2	0.1630	30,766 J/g
3	0.1004	28,099 J/g
4	0.1476	30,232 J/g

- Se muestra los datos obtenidos para el análisis de poder calorífico en base húmeda del producto sólido obtenido del proceso de pirólisis. Se realizó la calibración del equipo por medio de una pastilla de ácido benzoico. Para ello se utilizó un calorímetro IKA, modelo C200, con un rango de medición de 0 a 40,000 J y con una presión de operación de oxígeno de 30 bar.

Cuadro No. 36 Datos de poder calorífico en base húmeda del producto líquido de pirólisis

	Corrida	Masa de ácido benzoico (g) (± 0.0001 g)	Masa de ácido benzoico con producto líquido (g) (± 0.0001 g)	Poder calorífico en base húmeda (± 0.5)
Ácido benzoico	Calibración	0.5017	-	10,209 J/K
Fracción ligera	1	0.2082	0.4193	13,553 J/g
	2	0.1396	0.3703	11,237 J/g
	3	0.2918	0.5163	15,485 J/g
Fracción pesada	1	0.3604	0.5932	22,450 J/g
	2	0.2346	0.4490	24,352 J/g
	3	0.2654	0.5240	28, 152 J/g

- Se muestra los datos obtenidos para el análisis de poder calorífico en base húmeda del producto líquido obtenido del proceso de pirólisis, tanto para la fracción ligera como para la fracción pesada. Se realizó la calibración del equipo por medio de una pastilla de ácido benzoico. Para ello se utilizó un calorímetro IKA, modelo C200, con un rango de medición de 0 a 40,000 J y con una presión de operación de oxígeno de 30 bar.

Cuadro No. 37 Masas de crisoles llevados a peso constante para los análisis de humedad, cenizas y material volátil del producto sólido de pirólisis

	Crisol	Masa de crisol sin tapa (g) (± 0.0001 g)	Masa de crisol con tapa (g) (± 0.0001 g)
Masa inicial de los crisoles previo al secado	1	20.5949	34.2442
	2	17.2254	40.2157
	3	19.0259	40.7175
	4	17.6200	34.8917
Primera medición de masa de crisoles luego del secado	1	20.5898	34.2386
	2	17.2213	40.2119
	3	19.0217	40.7124
	4	17.6186	34.8898
Segunda medición de masa de crisoles luego del secado	1	20.5897	34.2372
	2	17.2210	40.2104
	3	19.0216	40.7123
	4	17.6184	34.8897

- Se muestra las masas de los crisoles llevados a peso constante para utilizarse en los análisis de humedad, cenizas y material volátil del producto sólido obtenido del proceso de pirólisis. Se muestra la masa inicial previo al secado y dos mediciones de masa luego de removerles la humedad. Para ello se utilizó una balanza analítica Ohaus, Pioneer Series, modelo PA114, con un rango de medición de 0 a 110 g y una incertidumbre de 0.0001 g. Además, se utilizó un horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010 con un rango de temperatura de 25 a 1200°C.

Cuadro No. 38 Masas para el análisis de humedad del producto sólido de pirólisis

	Crisol	Masa de crisol sin tapa (g) (± 0.0001 g)	Masa de crisol con tapa (g) (± 0.0001 g)
Masa inicial de los crisoles luego de haberse colocado en la desecadora	1	20.5901	34.2438
	2	17.2214	40.2137
	3	19.0218	40.7146
	4	17.6187	34.8914
Masa de los crisoles luego del secado	1	20.5896	34.2373
	2	17.2210	40.2104
	3	19.0216	40.7123
	4	17.6184	34.8897
Masa de los crisoles con la muestra de producto sólido	1	25.6092	39.2569
	2	21.7265	44.7159
	3	24.5268	46.2175
	4	23.6395	40.9108
Masa de los crisoles luego de 16 horas de secado en horno	1	25.4981	39.1456
	2	21.5194	44.5087
	3	24.5161	46.2066
	4	23.5223	40.7936

- Se muestra las masas de los crisoles con muestra utilizados para el análisis de la humedad del producto sólido obtenido del proceso de pirólisis. Se muestra la masa inicial de los crisoles luego de haberse colocado en una desecadora, la masa luego de llevarlos nuevamente a peso constante, la masa con producto sólido y la masa luego de 16 horas de secado en un horno. Para ello se utilizó un horno Indurama, modelo Oveido, con un rango de temperatura de 105 a 270°C. Las mediciones de masa se realizaron en una balanza analítica Ohaus, Pioneer Series, modelo PA114, con un rango de medición de 0 a 110 g y una incertidumbre de 0.0001 g.

Cuadro No. 39 Masas para el análisis de cenizas del producto sólido de pirólisis

	Crisol	Masa de crisol sin tapa (g) (± 0.0001 g)	Masa de crisol con tapa (g) (± 0.0001 g)
Masa de los crisoles con la muestra de producto sólido	1	25.4981	39.1456
	2	21.5194	44.5087
	3	24.5161	46.2066
	4	23.5223	40.7936
Masa de los crisoles después del secado en el horno	1	21.0781	34.7258
	2	17.7104	40.6998
	3	19.6045	41.2952
	4	18.2116	35.4829

- Se muestra las masas de los crisoles con muestra utilizados para el análisis de cenizas del producto sólido obtenido del proceso de pirólisis. Se muestra la masa inicial de la muestra dentro del crisol, que es la misma que en el análisis de humedad, y la masa de los crisoles después del proceso. Para ello se utilizó una balanza analítica Ohaus, Pioneer Series, modelo PA114, con un rango de medición de 0 a 110 g y una incertidumbre de 0.0001 g. Además, se utilizó un horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010 con un rango de temperatura de 25 a 1200°C.

Cuadro No. 40 Masas para el análisis de material volátil del producto sólido de pirólisis

	Crisol	Masa de crisol sin tapa (g) (± 0.0001 g)	Masa de crisol con tapa (g) (± 0.0001 g)
Masa inicial de los crisoles	1	20.5910	34.2381
	2	17.2225	40.2124
	3	19.0142	40.7130
	4	17.6192	34.8907
Masa de los crisoles luego del secado	1	20.5895	34.2372
	2	17.2210	40.2104
	3	19.0127	40.7034
	4	17.6184	34.8897
Masa de los crisoles con la muestra del producto sólido	1	25.5840	39.2317
	2	22.2751	45.2645
	3	24.1130	45.8037
	4	22.6208	39.8921
Masa de secado después del secado en horno	1	24.3357	37.9834
	2	20.9885	43.9779
	3	22.6874	44.3781
	4	21.2171	38.4884

- Se muestra las masas de los crisoles con muestra utilizados en el análisis de material volátil del producto sólido de pirólisis. Se muestra la masa inicial de los crisoles, la masa luego de haberse llevado nuevamente a peso constante, la masa de cada crisol con muestra de producto y la masa luego del proceso. Para ello se utilizó una balanza analítica Ohaus, Pioneer Series, modelo PA114, con un rango de medición de 0 a 110 g y una incertidumbre de 0.0001 g. Además, se utilizó un horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010 con un rango de temperatura de 25 a 1200°C.

Cuadro No. 41 Mediciones de densidad de bulto aireada del producto sólido de pirólisis

Corrida	Masa (g) (± 0.1 g)	Volumen (mL) (± 0.5 mL)
1	15.9	74.0
2	21.0	92.0
3	19.7	78.0
4	21.4	84.0

- Se muestra las mediciones de densidad de bulto aireada del producto sólido de pirólisis. Se colocó material en una probeta KIMAX de 50 mL y se midió la masa por medio de una balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de 0.1 g.

Cuadro No. 42 Mediciones de densidad de bulto compacta del producto sólido de pirólisis

Corrida	Masa (g) (± 0.1 g)	Volumen (mL) (± 0.5 mL)
1	15.9	60.0
2	21.0	80.0
3	19.7	72.0
4	21.4	78.0

- Se muestra las mediciones de densidad de bulto compacta del producto sólido de pirólisis. Se colocó material en una probeta KIMAX de 50 mL y se midió la masa por medio de una balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de 0.1 g.

Cuadro No. 43 Mediciones de densidad del producto líquido de pirólisis

Corrida	Masa (g) (± 0.1 g)	Volumen (mL) (± 0.5 mL)
1	60.1	60.0
2	186.7	87.0
3	209.6	110.0
4	239.2	139.0

- Se muestra las mediciones de densidad del producto líquido de pirólisis. Se colocó el producto líquido en una probeta KIMAX de 50 mL y se midió la masa por medio de una

balanza semianalítica Ohaus, modelo Valor 3000 Xtreme, con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de 0.1 g.

Cuadro No. 44 Mediciones de viscosidad del producto líquido de pirólisis

Corrida	Temperatura (°C) (\pm 0.05°C)	Porcentaje de torque (%)	Viscosidad (mPas) (\pm 0.05 mPas)
1	4.0	1.6	10.2
2	7.5	2.0	12.8
3	7.8	1.9	12.2
4	10.8	1.5	9.6
5	11.6	1.0	9.0
6	11.7	2.1	13.4
7	13.4	2.0	12.8

- Se muestra las mediciones de viscosidad realizadas para el producto líquido de pirólisis. Para ello se utilizó un viscosímetro Brookfield, DV-E series, utilizando el spindle 61 a 100 rpm. Se realizó las mediciones de temperatura con un termómetro digital infrarrojo...

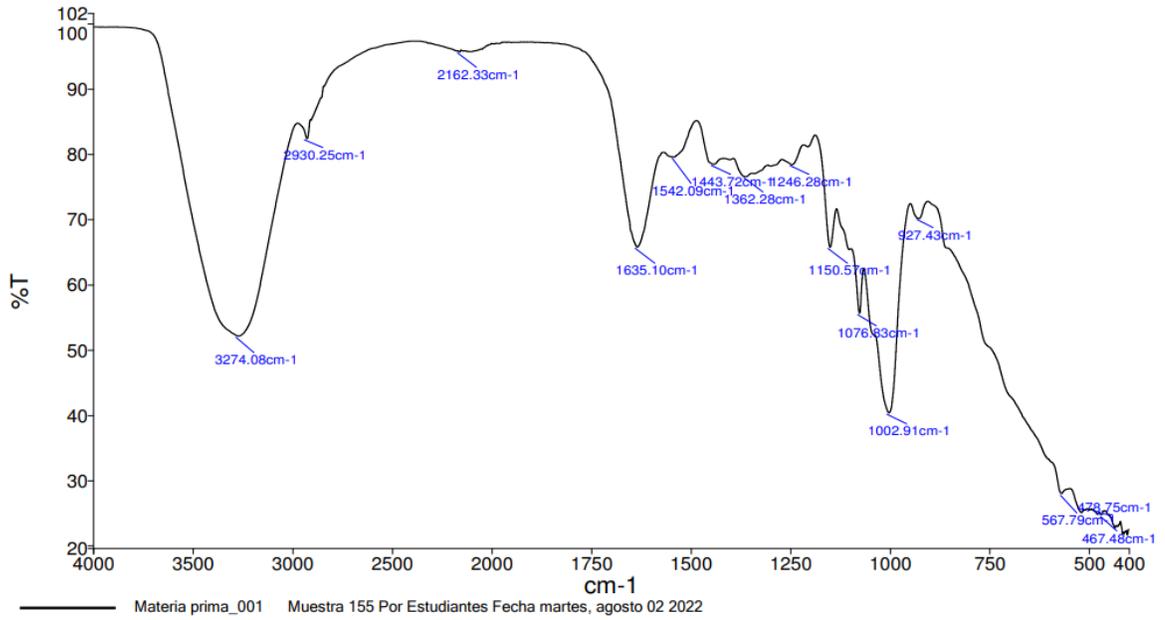
Cuadro No. 45 Mediciones del análisis de Kjeldahl del producto sólido de pirólisis

Muestra	Masa (g) (\pm 0.0001 g)	Volumen de ácido clorhídrico utilizado en titulación (mL) (\pm 0.05)
1	0.2502	3.3
2	0.2500	3.3
3	0.2502	3.4
4	0.2512	3.3
5	0.2517	3.4
6	0.2507	3.3

- Se muestra los datos obtenidos para el análisis Kjeldahl del producto sólido de pirólisis. Para ello se utilizó tres tabletas de reactivo de Kjeldahl de 5 g/tableta (libre de mercurio y selenio) marca Merck, una solución de ácido sulfúrico para análisis al 95-97% de pureza marca Merck y se utilizó una solución de ácido clorhídrico 0.125 N marca Merck. La medición de masa se

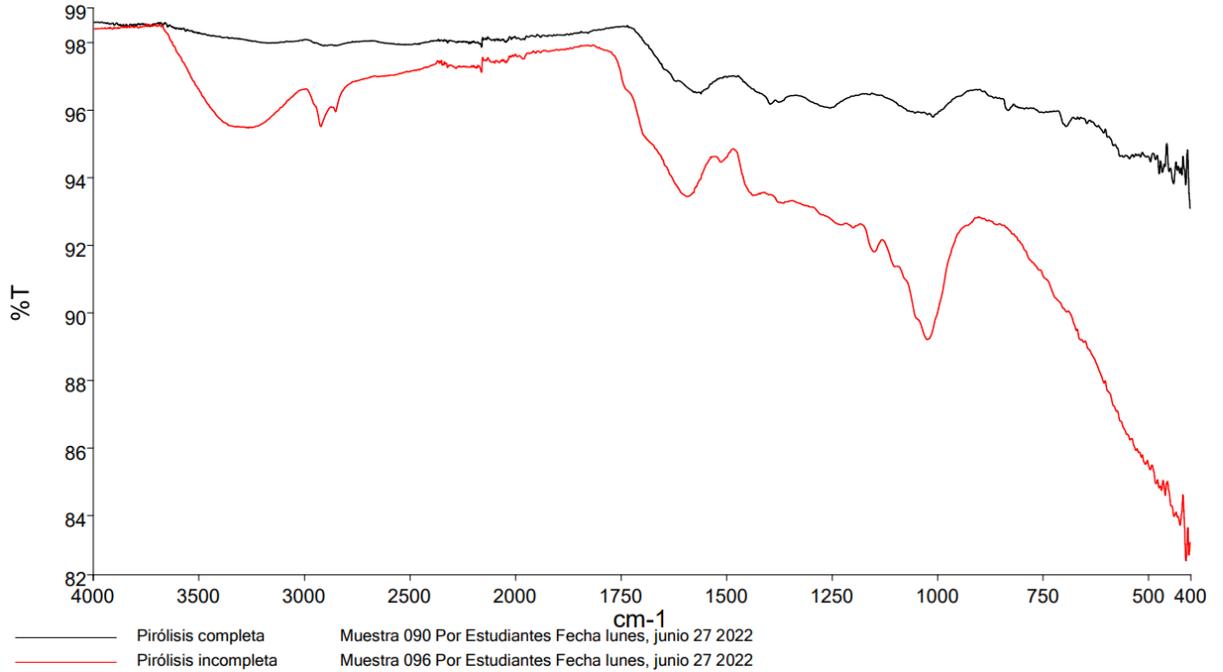
realizó en una balanza analítica Mettler Toledo, ME204, con rango de medición de 0 a 220 g y una incertidumbre de 0.0001 g. La digestión se realizó en un digestor Büchi, Speed digester K-425, un scrubber con solución de hidróxido de sodio y una unidad de destilación Büchi K-350.

Figura No. 26 Espectro IR de la cáscara y semilla de aguacate molida



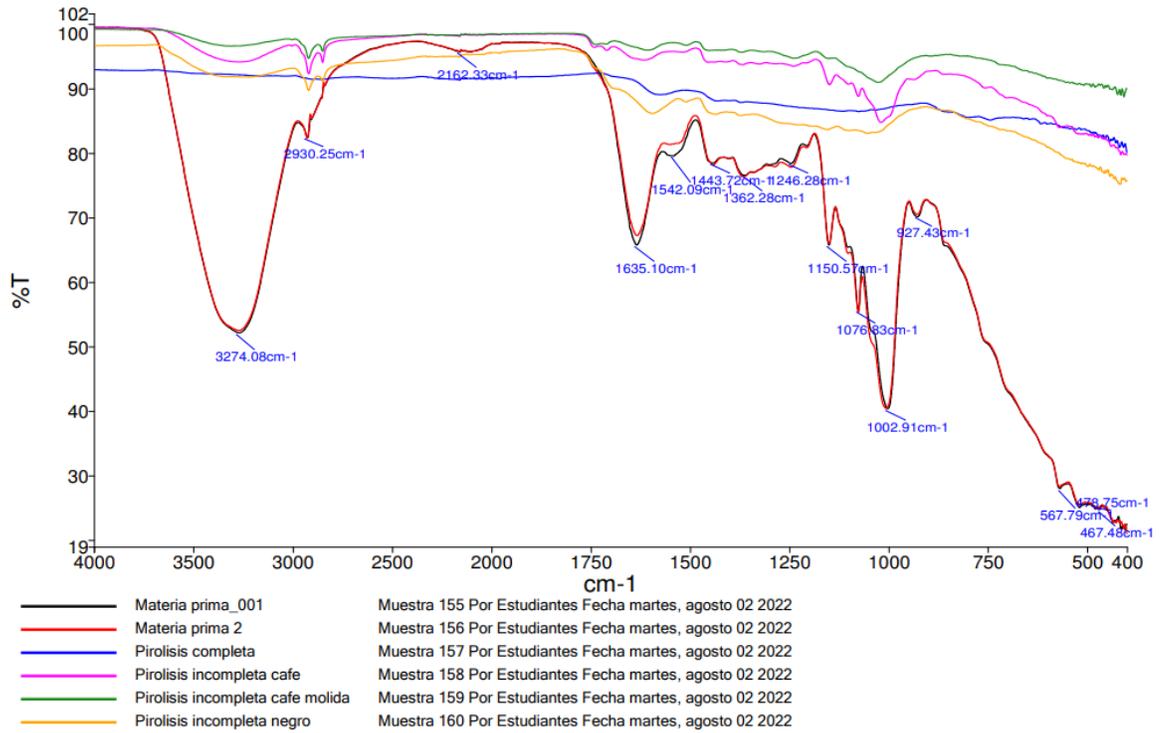
- Se muestra el espectro IR de la materia prima utilizada, siendo la cáscara y la semilla del aguacate. Para ello se utilizó un espectrofotómetro IR marca Perkin Elmer modelo Frontier.

Figura No. 27 Espectro IR de producto sólido de pirólisis en una corrida incompleta y completa



- Se muestra el espectro IR de producto sólido de pirólisis para la pirólisis incompleta y para la pirólisis completa. Para ello se utilizó un espectrofotómetro IR marca Perkin Elmer modelo Frontier.

Figura No. 28 Espectro IR sobrepuesto de materia prima, pirólisis incompleta y pirólisis completa



- Se muestra el espectro IR sobrepuesto para la materia prima, la pirólisis incompleta y la pirólisis completa. Para ello se utilizó un espectrofotómetro IR marca Perkin Elmer modelo Frontier.

C. Datos calculados

Cuadro No. 46 Densidad de bulto aireada y análisis estadístico de la materia prima

Corrida	Densidad de bulto aireada (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor inferior (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
1	155.284 ± 0.837	153.418 ± 0.415	12.981	138.146	168.690	8.46
2	167.229 ± 0.902					
3	135.874 ± 0.732					
4	155.284 ± 0.837					

- Se muestran los datos calculados de la densidad de bulto aireada de la materia prima en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 10 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 47 Densidad de bulto compacta y análisis estadístico de la materia prima

Corrida	Densidad de bulto compacta (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor inferior (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (kg/m ³)	Coficiente de variación (%)
1	197.634 ± 1.067	202.575 ± 0.547	9.882	190.949	214.201	4.88
2	217.398 ± 1.174					
3	197.634 ± 1.067					
4	197.634 ± 1.067					

- Se muestran los datos calculados de la densidad de bulto compacta de la materia prima en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 11 de la sección de datos originales.

Cuadro No. 48 Densidad de bulto de trabajo y análisis estadístico de la materia prima

Corrida	Densidad de bulto de trabajo (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor inferior (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
1	164.359 ± 1.254	165.675 ± 0.633	9.767	154.184	177.165	5.90
2	178.806 ± 1.365					
3	155.174 ± 1.183					
4	164.359 ± 1.254					

- Se muestran los datos calculados de la densidad de bulto de trabajo de la materia prima en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353.

Cuadro No. 49 Diámetro de partícula de la cáscara y la semilla de aguacate y su análisis estadístico

Material	Corrida	Diámetro de partícula (cm) (\pm 0.005 cm)	Media (cm) (\pm 0.00025 cm)	Desviación estándar (cm)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (cm)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (cm)	Coefficiente de variación (%)
Cáscara	1	3.45	3.53	0.135	3.371	3.689	3.82
	2	3.53					
	3	3.42					
	4	3.72					
Semilla	1	8.27	8.05	0.325	7.667	8.432	4.04
	2	7.63					
	3	7.96					
	4	8.34					

- Se muestra los datos calculados de diámetros de partícula para la cáscara y la semilla de aguacate en cuadruplicado para cada uno. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 12 de la sección de datos originales.

Cuadro No. 50 Análisis estadístico para la masa de la cáscara y semilla de aguacate

Material	Media (g) (\pm 0.032 g)	Desviación estándar (g)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (g)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (g)	Coefficiente de variación (%)
Cáscara	14.04	3.06	12.27	15.82	21.81
Semilla	25.85	10.08	20.01	31.69	39.01

- Se muestra el análisis estadístico para la masa de la cáscara y semilla de aguacate. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 9 grados de

libertad de 1.833. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 13 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 51 Análisis estadístico de la humedad en la cáscara y semilla de aguacate previo al proceso de secado

Material	Media (%) (\pm 0.0025%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
Cáscara	77.01	2.99	73.49	80.53	3.88
Semilla	47.25	5.20	41.13	53.37	11.01

- Se muestra el análisis estadístico para la humedad en la cáscara y la semilla del aguacate previo a realizar el proceso de secado. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en los cuadros 14 y 15 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 52 Análisis estadístico de la humedad de la cáscara y semilla de aguacate posterior al proceso de secado solar

Material	Media (%) (\pm 0.0025%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
Cáscara	32.49	3.52	28.34	36.63	10.83
Semilla	41.11	5.19	35.01	47.21	12.62

- Se muestra el análisis estadístico para la humedad en la cáscara y la semilla del aguacate luego del proceso de secado solar. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en los cuadros 16 y 17 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 53 Porcentaje de humedad en el proceso de secado en el secado solar

Día	Muestra	Porcentaje de humedad (%) (g/g)
1	1	77.01 ± 0.25
	2	77.01 ± 0.25
	3	77.01 ± 0.25
	4	77.01 ± 0.25
2	1	68.09 ± 0.08
	2	70.20 ± 0.06
	3	69.48 ± 0.11
	4	68.41 ± 0.06
3	1	51.60 ± 0.08
	2	50.77 ± 0.06
	3	44.22 ± 0.11
	4	53.48 ± 0.06
4	1	38.18 ± 0.08
	2	42.32 ± 0.06
	3	37.73 ± 0.11
	4	41.33 ± 0.06
5	1	35.57 ± 0.08
	2	40.10 ± 0.06
	3	36.45 ± 0.11
	4	40.38 ± 0.06

- Se muestra el porcentaje de humedad de las muestras de cáscara de aguacate utilizadas durante el proceso de secado solar. Los datos correspondientes a la masa se muestran en el Cuadro 18 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 54 Porcentaje de humedad en el proceso de secado en el secado en horno deshidratador

Tiempo (min)	Material	Muestra	Porcentaje de humedad (%)
30	Cáscara	1	52.43 ± 0.0014
		2	49.78 ± 0.0015
		3	54.95 ± 0.0015
		4	58.46 ± 0.0015
	Semilla	1	37.24 ± 0.0007
		2	36.75 ± 0.0006
		3	39.46 ± 0.0009
		4	40.30 ± 0.0006
60	Cáscara	1	35.48 ± 0.0011
		2	37.16 ± 0.0013
		3	33.04 ± 0.0012
		4	31.35 ± 0.0011
	Semilla	1	31.25 ± 0.0006
		2	30.78 ± 0.0005
		3	32.06 ± 0.0008
		4	31.12 ± 0.0005

- Se muestra los porcentajes de humedad calculados en base a la masa y humedad inicial de las muestras utilizadas de cáscara y semilla de aguacate. Los datos utilizados se encuentran en los cuadros 19 y 20 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 55 Análisis estadístico de la humedad de la cáscara y semilla de aguacate posterior al proceso de secado en horno deshidratador

Tiempo (min)	Material	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
0	Cáscara	77.62 ± 0.0025	1.45	75.92	79.32	1.86
	Semilla	49.65 ± 0.0025	2.19	47.08	52.22	4.40
30	Cáscara	53.91 ± 0.0007	3.69	49.55	58.26	6.86
	Semilla	38.44 ± 0.0003	1.71	36.42	40.45	4.45
60	Cáscara	34.26 ± 0.0006	2.57	31.23	37.28	7.51
	Semilla	31.30 ± 0.0003	0.54	30.66	31.94	1.73

- Se muestra el análisis estadístico de la humedad de la cáscara y semilla de aguacate para el proceso de secado en horno deshidratador. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353.

Cuadro No. 56 Eficacias de los equipos de reducción de tamaño utilizados para la materia prima

Equipo de reducción de tamaño	Masa material seco (kg) (± 0.01 kg)	Masa material molido (kg) (± 0.01 kg)	Pérdidas (kg) (± 0.014 kg)	Eficacia del molino (%)
Discos	0.340	0.320	0.200	94.12 ± 4.04
Cuchillas (Materia prima sin secar)	7.92	7.32	0.60	92.42 ± 0.17%
Cuchillas (Materia prima seca)	4.28	4.11	0.17	96.03 ± 0.32%

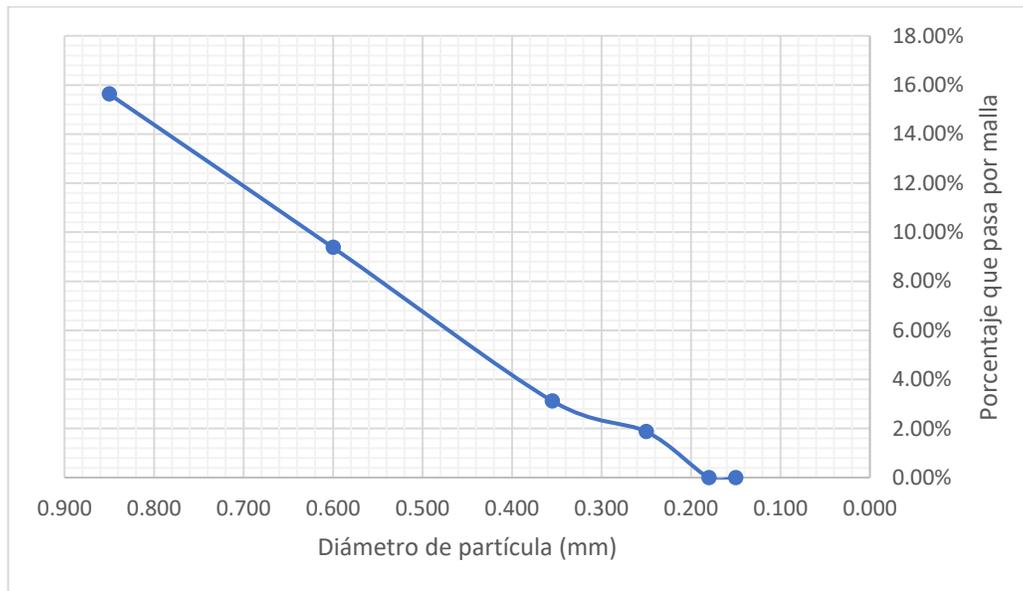
- Se muestra las eficacias de los molinos utilizados, siendo el molino de discos y la trituradora de cuchillas. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 21 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 57 Cálculos de análisis granulométrico del molino de discos

Malla Mesh	Masa (kg)	Porcentaje en la malla (%)	Porcentaje que pasa (%)	Tamaño de partícula (µm)
20	0.27 ± 0.05	84.38 ± 33.36	15.63 ± 33.36	850
28	0.02 ± 0.05	6.25 ± 15.78	9.38 ± 36.91	600
42	0.02 ± 0.05	6.25 ± 15.78	3.13 ± 40.14	355
60	0.004 ± 0.0001	1.25 ± 0.44	1.88 ± 40.14	250
80	0.006 ± 0.0001	1.88 ± 0.66	0.00	180
100	0	0.00	0.00	150
>100	0	0.00	0.00	<150

- Se muestran los cálculos realizados para el análisis granulométrico del molino de discos. Se muestra para cada malla Mesh, el porcentaje retenido en la malla y el porcentaje que atraviesa la malla. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 22 en la sección de datos originales.

Figura No. 29 Gráfico de análisis granulométrico para el molino de discos



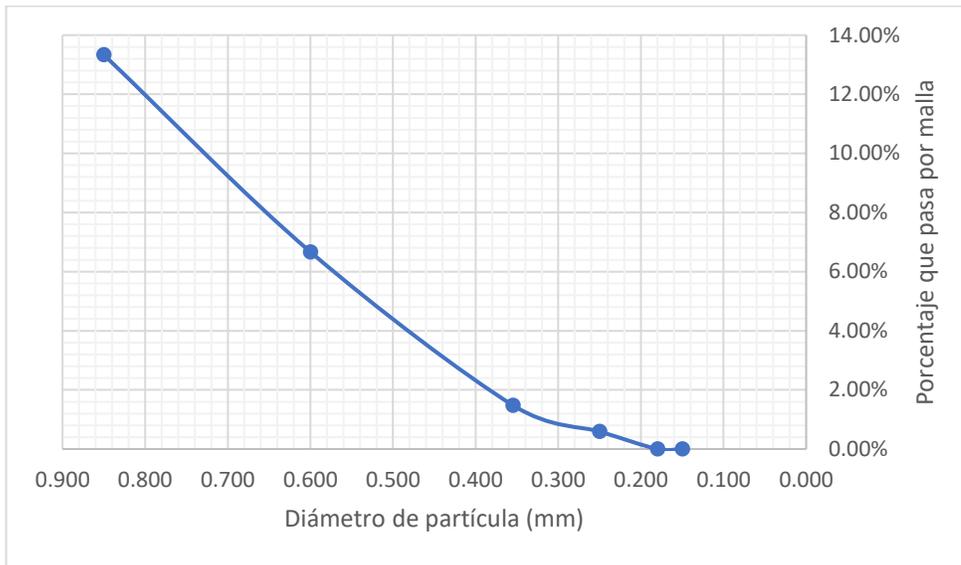
- Se muestra el gráfico de análisis granulométrico de la molienda de la cáscara de aguacate para el molino de discos. Se realizó el gráfico por medio del software Excel, se observa en el eje Y el porcentaje que atraviesa la malla y en el eje X el diámetro de partícula correspondiente a la malla Mesh.

Cuadro No. 58 Cálculos de análisis granulométrico de la trituradora de cuchillas

Malla Mesh	Masa (kg)	Porcentaje en la malla (%)	Porcentaje que pasa (%)	Tamaño de partícula (μm)
20	1.17 ± 0.05	86.67 ± 8.08	13.33 ± 8.08	850
28	0.09 ± 0.05	6.67 ± 3.74	6.67 ± 8.90	600
42	0.07 ± 0.05	5.19 ± 3.73	1.48 ± 9.65	355
60	0.012 ± 0.0001	0.89 ± 0.07	0.59 ± 9.65	250
80	0.008 ± 0.0001	0.59 ± 0.05	0.00	180
100	0.00	0.00	0.00	150
>100	0.00	0.00	0.00	<150

- Se muestran los cálculos realizados para el análisis granulométrico de la trituradora de cuchillas utilizado para la materia prima. Se muestra para cada malla Mesh, el porcentaje retenido en la malla y el porcentaje que atraviesa la malla. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 23 en la sección de datos originales.

Figura No. 30 Gráfico de análisis granulométrico para la trituradora de cuchillas



- Se muestra el gráfico de análisis granulométrico de la molienda de la materia prima para la trituradora de cuchillas. Se realizó el gráfico por medio del software Excel, se observa en el eje Y el porcentaje que atraviesa la malla y en el eje X el diámetro de partícula correspondiente a la malla Mesh.

Cuadro No. 59 Análisis estadístico de la humedad del material molido

Material	Media (%) (\pm 0.0025%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor máximo (%)	Coefficiente de variación (%)
Cáscara y semilla molida	47.85	1.16	46.49	49.21	2.42

- Se muestra el análisis estadístico de la humedad del material molido, siendo la cáscara y la semilla molida. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 24 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 60 Densidad de bulto aireada y análisis estadístico del material molido

Corrida	Densidad de bulto aireada (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor máximo (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
1	419.23 ± 8.93	388.56 ± 3.73	22.90	361.61	415.50	5.89
2	380.65 ± 6.94					
3	364.71 ± 6.12					
4	389.66 ± 7.55					

- Se muestra los datos calculados de la densidad de bulto aireada del material molido en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 25 en la sección de datos originales.

Cuadro no. 61 densidad de bulto compacta y análisis estadístico del material molido

Corrida	Densidad de bulto compacta (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor máximo (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
1	473.91 ± 11.18	464.68 ± 5.10	18.59	442.80	486.55	4.00
2	437.04 ± 8.90					
3	476.92 ± 9.95					
4	470.83 ± 10.66					

- Se muestra los datos calculados de la densidad de bulto compacta del material molido en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 26 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 62 Densidad de bulto de trabajo y análisis estadístico del material molido

Corrida	Densidad de bulto de trabajo (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor máximo (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
1	425.54 ± 13.53	402.06 ± 5.86	17.07	381.98	422.13	4.24
2	387.92 ± 10.60					
3	391.11 ± 10.47					
4	403.65 ± 12.03					

- Se muestra los datos calculados de la densidad de bulto de trabajo del material molido en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353.

Cuadro No. 63 Balance de masa de la pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla)

Corrida	Masa inicial (g) (± 0.1 g)	Masa de producto sólido (g) (± 0.1 g)	Masa de producto líquido (g) (± 0.1 g)	Masa de agua (g) (± 0.1 g)	Masa de producto gaseoso (g) (± 0.2 g)
1	40.0	8.7	8.5	14.3	8.5
2	60.0	12.6	12.7	21.5	13.2
3	70.0	16.4	14.0	25.5	14.1
4	70.0	17.2	14.1	24.3	14.4
5	70.0	16.2	13.5	25.3	15.0

- Se muestra el balance de masa realizado para el reactor de pirólisis de 100 g al tener una proporción de alimentación de 50:50 (Cáscara:Semilla). Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro no. 27 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 64 Rendimiento de los productos de pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla)

Corrida	Rendimiento producto sólido (%)	Rendimiento producto líquido (%)	Rendimiento de agua (%)	Rendimiento de producto gaseoso (%)	Conversión (%)
1	21.75 ± 0.26	21.25 ± 0.26	35.75 ± 0.27	21.25 ± 0.50	78.25 ± 0.54
2	21.00 ± 0.17	21.17 ± 0.17	35.83 ± 0.18	22.00 ± 0.34	79.00 ± 0.36
3	23.43 ± 0.15	20.00 ± 0.15	36.43 ± 0.15	20.14 ± 0.29	76.57 ± 0.31
4	24.57 ± 0.15	20.14 ± 0.15	34.71 ± 0.15	20.57 ± 0.29	75.43 ± 0.31
5	23.14 ± 0.15	19.29 ± 0.15	36.14 ± 0.15	21.43 ± 0.29	76.86 ± 0.31

- Se muestra el rendimiento de los productos obtenidos para el reactor de pirólisis de 100 g al tener una proporción de alimentación de 50:50 (Cáscara:Semilla). Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro no. 28 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 65 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla)

Producto	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
Sólido	22.78 ± 0.08	1.41	21.27	24.29	6.20
Líquido	20.37 ± 0.08	0.83	19.48	21.26	4.09
Agua	35.77 ± 0.08	0.65	35.08	36.47	1.82
Gas	21.08 ± 0.16	0.73	20.30	21.86	3.46
Conversión	77.2 ± 0.17	1.41	75.71	78.73	1.83

- Se muestra el análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla). Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 4 grados de libertad de 2.1318.

Cuadro No. 66 Rendimiento de los productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla)

Corrida	Rendimiento producto sólido (%)	Rendimiento producto líquido (%)	Rendimiento de producto gaseoso (%)	Conversión (%)
1	33.85 ± 0.70	33.07 ± 0.70	33.07 ± 0.97	66.15 ± 1.88
2	32.73 ± 0.47	32.99 ± 0.47	34.29 ± 0.65	67.27 ± 1.25
3	36.85 ± 0.41	31.46 ± 0.40	31.69 ± 0.56	63.15 ± 1.08
4	37.64 ± 0.40	30.85 ± 0.39	31.51 ± 0.54	62.36 ± 1.05
5	36.24 ± 0.40	30.20 ± 0.40	33.56 ± 0.56	63.76 ± 1.08

- Se muestra el rendimiento de los productos en base seca obtenidos para el reactor de pirólisis de 100 g al tener una proporción de alimentación de 50:50 (Cáscara:Semilla).

Cuadro No. 67 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla)

Producto	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
Sólido	35.46 ± 0.22	2.08	33.24	37.68	5.87
Líquido	31.72 ± 0.22	1.28	30.35	33.08	4.04
Gas	32.82 ± 0.30	1.20	31.54	34.10	3.66
Conversión	64.54 ± 0.58	2.08	62.32	66.76	3.23

- Se muestra el análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla). Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 4 grados de libertad de 2.1318.

Cuadro No. 68 Balance de masa de la pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación aleatoria

Corrida	Masa inicial (g) (± 0.1 g)	Masa de producto sólido (g) (± 0.1 g)	Masa de producto líquido (g) (± 0.1 g)	Masa de agua (g) (± 0.1 g)	Masa de producto gaseoso (g) (± 0.2 g)
1	70.0	11.7	32.4	20.7	5.2
2	70.0	10.4	29.6	22.4	7.6
3	70.0	8.8	34.6	20.2	6.4

- Se muestra el balance de masa de la pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación aleatoria. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 28 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 69 Rendimiento de los productos de los productos de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria

Corrida	Rendimiento producto sólido (%) ($\pm 0.14\%$)	Rendimiento producto líquido (%) ($\pm 0.16\%$)	Rendimiento de agua (%) ($\pm 0.15\%$)	Rendimiento producto gaseoso (%) ($\pm 0.29\%$)	Conversión (%)
1	16.71	46.29	29.57	7.43	83.29 \pm 0.23
2	14.86	42.29	32.00	10.86	85.14 \pm 0.24
3	12.57	49.43	28.86	9.14	87.43 \pm 0.24

- Se muestra el rendimiento de los productos de pirólisis obtenidos en el reactor de 100 g en proporción de alimentación aleatoria.

Cuadro No. 70 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria

Producto	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coficiente de variación (%)
Sólido	14.71 \pm 0.08	3.58	8.68	20.75	24.33
Líquido	46.00 \pm 0.09	3.58	39.96	52.04	7.78
Agua	30.14 \pm 0.09	1.65	27.37	32.92	5.47
Gas	9.14 \pm 0.17	1.71	6.25	12.03	18.75
Conversión	85.29 \pm 0.24	2.08	81.79	88.78	2.43

- Se muestra el análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 2 grados de libertad de 2.920.

Cuadro No. 71 Rendimiento de los productos de los productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria

Corrida	Rendimiento producto sólido (%)	Rendimiento producto líquido (%)	Rendimiento producto gaseoso (%)	Conversión (%)
1	23.73 ± 0.21	65.72 ± 0.24	10.55 ± 0.41	76.27 ± 0.21
2	21.85 ± 0.22	62.18 ± 0.25	15.97 ± 0.42	78.15 ± 0.22
3	17.67 ± 0.20	69.48 ± 0.24	12.85 ± 0.40	82.33 ± 0.22

- Se muestra el rendimiento de los productos de pirólisis en base seca obtenidos en el reactor de 100 g en proporción de alimentación aleatoria.

Cuadro No. 72 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria

Producto	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
Sólido	21.08 ± 0.12	3.10	15.85	26.31	14.71
Líquido	65.79 ± 0.14	3.65	59.65	71.94	5.54
Gas	13.12 ± 0.24	2.72	8.54	17.71	20.72
Conversión	78.92 ± 0.13	3.10	73.69	84.15	3.93

- Se muestra el análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 2 grados de libertad de 2.920.

Cuadro No. 73 Balance de masa de la pirólisis en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria

Proceso	Corrida	Masa inicial (g) (± 10 g)	Masa de producto sólido (g) (± 10 g)	Masa de producto líquido (g) (± 10 g)	Masa de agua (g) (± 10 g)	Masa de producto gaseoso (g) (± 20 g)
Incompleto	1	2420.0	584.1	992.7	660.2	183.0
	2	2380.0	658.9	972.9	558.5	189.7
Completo	1	2300.0	391.4	1444.6	319.6	144.4
	2	2240.0	294.6	1378.5	314.0	252.9
	3	2280.0	292.0	1310.2	540.5	137.3

- Se muestra los balances de masa de la pirólisis en el reactor de 7.6 kg al tener una proporción de alimentación aleatoria. Se muestra tanto el proceso de pirólisis incompleto como el proceso de pirólisis completo. Los datos utilizados se encuentran en los Cuadros no. 29 y 30 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 74 Rendimiento de los productos de pirólisis en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria.

Proceso	Corrida	Rendimiento producto sólido (%)	Rendimiento producto líquido (%)	Rendimiento de agua (%)	Rendimiento de producto gaseoso (%)	Conversión (%)
Incompleto	1	24.14 \pm 0.43	41.02 \pm 0.45	27.28 \pm 0.43	7.56 \pm 0.83	75.86 \pm 1.03
	2	27.68 \pm 0.44	40.88 \pm 0.45	23.47 \pm 0.43	7.97 \pm 0.84	72.32 \pm 1.05
Completo	1	17.02 \pm 0.44	62.81 \pm 0.51	13.90 \pm 0.44	6.28 \pm 0.87	82.98 \pm 1.10
	2	13.15 \pm 0.45	61.54 \pm 0.52	14.02 \pm 0.45	11.29 \pm 0.89	86.85 \pm 1.13
	3	12.81 \pm 0.44	57.46 \pm 0.51	23.71 \pm 0.45	6.02 \pm 0.88	87.19 \pm 1.11

- Se muestra el rendimiento de los productos de pirólisis en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria. Se muestra tanto el proceso de pirólisis incompleto como el proceso de pirólisis completo.

Cuadro No. 75 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria para el proceso completo

Producto	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
Sólido	14.33 ± 0.15	2.34	10.38	18.27	16.32
Líquido	60.60 ± 0.25	2.79	55.90	65.31	4.61
Agua	17.21 ± 0.17	5.63	7.72	26.70	32.72
Gas	7.86 ± 0.39	2.97	2.86	12.87	37.77
Conversión	81.04 ± 0.49	6.68	69.79	92.30	8.24

- Se muestra el análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria para el proceso completo. Se utilizó un valor t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 2 grados de libertad de 2.920.

Cuadro No. 76 Rendimiento de los productos de pirólisis en base seca en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria

Proceso	Corrida	Rendimiento producto sólido (%)	Rendimiento producto líquido (%)	Rendimiento de producto gaseoso (%)	Conversión (%)
Incompleto	1	33.19 ± 1.02	56.41 ± 1.08	10.40 ± 1.39	66.81 ± 1.77
	2	36.17 ± 0.99	53.41 ± 1.04	10.41 ± 1.35	63.83 ± 1.70
Completo	1	19.76 ± 0.89	72.94 ± 1.02	7.29 ± 1.24	80.24 ± 1.60
	2	15.30 ± 0.91	71.57 ± 1.04	13.13 ± 1.28	84.70 ± 1.65
	3	16.79 ± 1.01	75.32 ± 1.17	7.89 ± 1.41	83.21 ± 1.83

- Se muestra el rendimiento de los productos de pirólisis en base seca en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria. Se muestra tanto el proceso de pirólisis incompleto como el proceso de pirólisis completo.

Cuadro No. 77 Análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria para el proceso completo

Producto	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
Sólido	17.28 ± 0.31	2.27	13.45	21.12	13.16
Líquido	73.28 ± 0.53	1.90	70.08	76.48	2.59
Gas	9.44 ± 0.57	3.21	4.02	14.85	34.03
Conversión	82.72 ± 0.84	2.27	78.88	86.55	2.75

- Se muestra el análisis estadístico del rendimiento de productos de pirólisis en base seca en el reactor de 7.6 kg en proporción de alimentación aleatoria para el proceso completo. Se utilizó un valor t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 2 grados de libertad de 2.920.

Cuadro No. 78 Cálculo de cambio de masa en el reactor y de formación de producto gaseoso en el análisis cinético del reactor de 100 g.

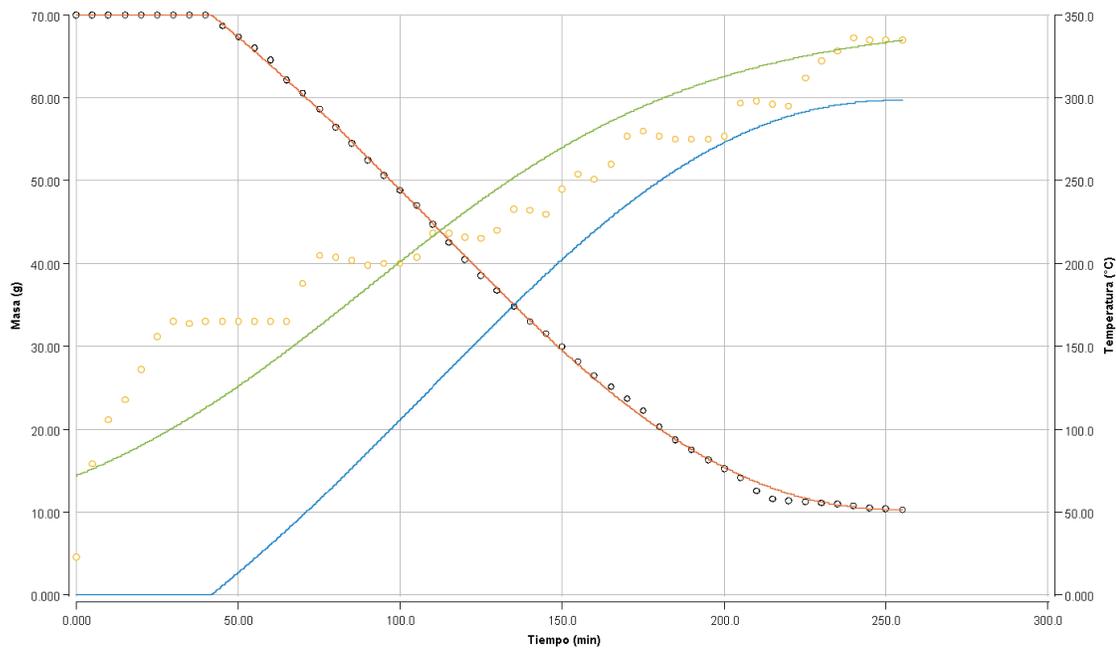
Tiempo (min)	Δm_L (g) (\pm 0.14)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
0	-	-	-	70 ± 0.1	0
5	0.00	0.00	0.00	70 ± 0.1	0
10	0.00	0.00	0.00	70 ± 0.1	0
15	0.00	0.00	0.00	70 ± 0.1	0
20	0.00	0.00	0.00	70 ± 0.1	0
25	0.00	0.00	0.00	70 ± 0.1	0
30	0.00	0.00	0.00	70 ± 0.1	0
35	0.00	0.00	0.00	70 ± 0.1	0
40	0.00	0.00	0.00	70 ± 0.1	0
45	0.00	0.00	0.00	68.7 ± 0.14	0
50	0.00	0.00	0.00	67.4 ± 0.17	0
55	0.00	0.00	0.00	66 ± 0.20	0
60	0.00	0.00	0.00	64.5 ± 0.22	0

Tiempo (min)	Δm_L (g) (\pm 0.14)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
65	0.00	0.00	0.00	62.2 \pm 0.24	0
70	0.00	0.00	0.00	60.6 \pm 0.26	0
75	0.00	0.00	0.00	58.6 \pm 0.28	0
80	0.00	0.00	0.00	56.5 \pm 0.30	0
85	0.00	0.00	0.00	54.5 \pm 0.32	0
90	0.00	0.00	0.00	52.5 \pm 0.33	0
95	0.00	0.00	0.00	50.6 \pm 0.35	0
100	0.00	0.00	0.00	48.9 \pm 0.36	0
105	1.60	0.318 \pm 0.059	1.918 \pm 0.153	46.98 \pm 0.38	0.318 \pm 0.059
110	0.30	0.060 \pm 0.030	0.360 \pm 0.145	44.70 \pm 0.40	0.378 \pm 0.066
115	-0.10	-0.020 \pm 0.028	-0.120 \pm 0.144	42.55 \pm 0.42	0.358 \pm 0.072
120	-0.10	-0.020 \pm 0.028	-0.120 \pm 0.144	40.51 \pm 0.43	0.338 \pm 0.077
125	-0.10	-0.020 \pm 0.028	-0.120 \pm 0.144	38.59 \pm 0.45	0.318 \pm 0.082
130	-0.10	-0.020 \pm 0.028	-0.120 \pm 0.144	36.79 \pm 0.47	0.298 \pm 0.087
135	0.10	0.020 \pm 0.028	0.120 \pm 0.144	34.87 \pm 0.49	0.318 \pm 0.091
140	0.00	0.000	0.000	32.96 \pm 0.51	0.318 \pm 0.091
145	-0.40	-0.080 \pm 0.031	-0.480 \pm 0.145	31.52 \pm 0.53	0.239 \pm 0.096
150	0.10	0.020 \pm 0.028	0.120 \pm 0.144	29.96 \pm 0.55	0.258 \pm 0.100
155	0.20	0.040 \pm 0.029	0.240 \pm 0.144	28.16 \pm 0.57	0.298 \pm 0.104
160	-0.10	-0.020 \pm 0.028	-0.120 \pm 0.144	26.48 \pm 0.58	0.278 \pm 0.108
165	-0.30	-0.060 \pm 0.030	-0.360 \pm 0.145	25.16 \pm 0.60	0.219 \pm 0.112
170	0.10	0.020 \pm 0.028	0.120 \pm 0.144	23.73 \pm 0.62	0.239 \pm 0.116
175	0.00	0.000	0.000	22.29 \pm 0.64	0.239 \pm 0.119
180	0.40	0.080 \pm 0.031	0.480 \pm 0.145	20.37 \pm 0.66	0.318 \pm 0.123
185	-0.20	-0.040 \pm 0.029	-0.240 \pm 0.144	18.69 \pm 0.68	0.278 \pm 0.126
190	-0.40	-0.080 \pm 0.031	-0.480 \pm 0.145	17.49 \pm 0.70	0.199 \pm 0.130
195	0.00	0.000	0.000	16.29 \pm 0.72	0.199 \pm 0.130
200	-0.10	-0.020 \pm 0.028	-0.120 \pm 0.144	15.21 \pm 0.74	0.179 \pm 0.133

Tiempo (min)	Δm_L (g) (\pm 0.14)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
205	0.00	0.000	0.000	14.14 \pm 0.76	0.179 \pm 0.133
210	0.40	0.080 \pm 0.031	0.480 \pm 0.145	12.58 \pm 0.78	0.258 \pm 0.137
215	-0.50	-0.099 \pm 0.032	-0.599 \pm 0.145	11.62 \pm 0.79	0.159 \pm 0.140
220	-0.60	-0.119 \pm 0.034	-0.719 \pm 0.145	11.38 \pm 0.81	0.040 \pm 0.145
225	-0.10	-0.020 \pm 0.028	-0.120 \pm 0.144	11.26 \pm 0.83	0.020 \pm 0.147
230	0.00	0.000	0.000	11.14 \pm 0.85	0.020 \pm 0.147
235	0.00	0.000	0.000	11.02 \pm 0.87	0.020 \pm 0.147
240	0.10	0.020 \pm 0.028	0.120 \pm 0.144	10.78 \pm 0.89	0.040 \pm 0.150
245	0.00	0.000	0.000	10.54 \pm 0.91	0.040 \pm 0.153
250	-0.10	-0.020 \pm 0.028	-0.120 \pm 0.144	10.42 \pm 0.93	0.020 \pm 0.155
255	0.00	0.000	0.000	10.30 \pm 0.94	0.020 \pm 0.155

- Se muestra los datos calculados para el análisis cinético en el reactor de 100 g. Se muestra el cambio de la masa del producto líquido en función del tiempo, correspondiente a Δm_L ; el cambio de masa del producto gaseoso en función del tiempo, correspondiente a Δm_g ; se muestra el cambio de masa dentro del reactor en función del tiempo, correspondiente a Δm_R ; y se muestra la masa de material sólido dentro del reactor y la masa de gas producido ambos en función del tiempo. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro no. 31 en la sección de datos originales.

Figura No. 31 Predicción de la masa dentro del reactor de 100 g en función del tiempo.



- Se muestra el análisis cinético para el reactor de 100 g. Se realizó la siguiente gráfica en el software Berkeley Madonna, se muestra en el eje X el tiempo en minutos, en el eje Y izquierdo la masa en g y en el eje Y derecho la temperatura en °C. La curva anaranjada corresponde a la ecuación ajustada de la masa dentro del reactor en función del tiempo, la curva azul corresponde a la masa de producto en función del tiempo y la curva verde corresponde a la temperatura en función del tiempo.

Cuadro No. 79 Cálculo de cambio de masa en el reactor y de formación de producto gaseoso en el análisis cinético del reactor de 7.6 kg.

Tiempo (min)	Δm_L (g) (± 0.1 g)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
0	-	-	-	2280 ± 10	0
5	0.00	0.000	0.000	2280 ± 10	0
10	0.00	0.000	0.000	2280 ± 10	0
15	0.00	0.000	0.000	2280 ± 10	0
20	0.00	0.000	0.000	2280 ± 10	0

Tiempo (min)	Δm_L (g) (\pm 0.14)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
25	0.00	0.000	0.000	2280 \pm 10	0
30	0.00	0.000	0.000	2280 \pm 10	0
35	0.00	0.000	0.000	2280 \pm 10	0
40	0.00	0.000	-3.900 \pm 0.03	2276.1 \pm 10	0
45	0.00	0.000	-12.400 \pm 0.09	2263.7 \pm 10	0
50	0.00	0.000	-20.800 \pm 0.16	2242.9 \pm 10	0
55	0.00	0.000	-28.500 \pm 0.22	2214.4 \pm 10	0
60	0.00	0.000	-22.300 \pm 0.17	2192.1 \pm 10	0
65	0.00	0.000	-26.400 \pm 0.20	2165.7 \pm 10	0
70	0.00	0.000	-25.900 \pm 0.20	2139.8 \pm 10	0
75	0.00	0.000	-22.600 \pm 0.17	2117.2 \pm 10	0
80	0.00	0.000	-24.400 \pm 0.18	2092.8 \pm 10	0
85	0.00	0.000	-22.700 \pm 0.17	2070.1 \pm 10	0
90	0.00	0.000	-21.300 \pm 0.16	2048.8 \pm 10.01	0
95	0.00	0.000	-22.300 \pm 0.17	2026.5 \pm 10.01	0
100	0.00	0.000	-19.500 \pm 0.15	2007 \pm 10.01	0
105	0.00	0.000	-21.900 \pm 0.17	1985.1 \pm 10.01	0
110	0.00	0.000	-19.000 \pm 0.14	1966.1 \pm 10.01	0
115	0.00	0.000	-21.200 \pm 0.16	1944.9 \pm 10.01	0
120	0.00	0.000	-17.900 \pm 0.14	1927 \pm 10.01	0
125	0.00	0.000	-17.600 \pm 0.13	1909.4 \pm 10.01	0
130	0.00	0.000	-18.700 \pm 0.14	1890.7 \pm 10.01	0
135	0.00	0.000	-19.600 \pm 0.15	1871.1 \pm 10.01	0
140	0.00	0.000	-21.100 \pm 0.16	1850 \pm 10.01	0
145	0.00	0.000	-22.600 \pm 0.17	1827.4 \pm 10.01	0
150	0.00	0.000	-20.600 \pm 0.16	1806.8 \pm 10.01	0
155	0.00	0.000	-20.000 \pm 0.15	1786.8 \pm 10.01	0
160	0.00	0.000	-29.500 \pm 0.22	1757.3 \pm 10.01	0

Tiempo (min)	Δm_L (g) (\pm 0.14)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
165	0.00	0.000	-17.800 ± 0.13	1739.5 ± 10.01	0
170	17.10	1.792 ± 0.019	18.892 ± 0.143	1720.608 ± 10.014	1.792 ± 0.019
175	3.70	0.388 ± 0.015	4.088 ± 0.142	1697.628 ± 10.014	2.180 ± 0.025
180	-0.20	-0.021 ± 0.015	-0.221 ± 0.142	1674.870 ± 10.015	2.159 ± 0.029
185	-1.90	-0.199 ± 0.015	-2.099 ± 0.142	1654.210 ± 10.015	1.960 ± 0.032
190	1.00	0.105 ± 0.015	1.105 ± 0.142	1632.446 ± 10.016	2.064 ± 0.036
195	5.60	0.587 ± 0.015	6.187 ± 0.142	1604.494 ± 10.016	2.651 ± 0.042
200	-6.20	-0.650 ± 0.016	-6.850 ± 0.142	1583.393 ± 10.017	2.002 ± 0.044
205	-2.40	-0.252 ± 0.015	-2.652 ± 0.142	1564.943 ± 10.017	1.750 ± 0.045
210	0.90	0.094 ± 0.015	0.994 ± 0.142	1545.498 ± 10.018	1.844 ± 0.047
215	-2.80	-0.293 ± 0.015	-3.093 ± 0.142	1529.147 ± 10.019	1.551 ± 0.049
220	2.00	0.210 ± 0.015	2.210 ± 0.142	1510.587 ± 10.019	1.761 ± 0.051
225	-0.50	-0.052 ± 0.015	-0.552 ± 0.142	1492.579 ± 10.020	1.708 ± 0.053
230	13.60	1.425 ± 0.018	15.025 ± 0.143	1459.545 ± 10.022	3.133 ± 0.056
235	-4.00	-0.419 ± 0.015	-4.419 ± 0.142	1430.931 ± 10.023	2.714 ± 0.058

Tiempo (min)	Δm_L (g) (\pm 0.14)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
240	33.30	3.490 ± 0.029	36.790 ± 0.144	1365.528 ± 10.023	6.204 ± 0.065
245	-15.00	-1.572 ± 0.019	-16.572 ± 0.143	1316.696 ± 10.023	4.632 ± 0.068
250	-1.90	-0.199 ± 0.015	-2.099 ± 0.142	1269.963 ± 10.023	4.433 ± 0.069
255	-8.50	-0.891 ± 0.016	-9.391 ± 0.142	1232.621 ± 10.024	3.542 ± 0.071
260	-1.20	-0.126 ± 0.015	-1.326 ± 0.142	1196.605 ± 10.025	3.416 ± 0.073
265	3.10	0.325 ± 0.015	3.425 ± 0.142	1157.164 ± 10.026	3.741 ± 0.074
270	-5.90	-0.618 ± 0.015	-6.518 ± 0.142	1124.241 ± 10.027	3.123 ± 0.076
275	-1.80	-0.189 ± 0.015	-1.989 ± 0.142	1093.306 ± 10.027	2.934 ± 0.077
280	3.00	0.314 ± 0.015	3.314 ± 0.142	1059.058 ± 10.028	3.249 ± 0.079
285	2.20	0.231 ± 0.015	2.431 ± 0.142	1022.379 ± 10.029	3.479 ± 0.080
290	-10.20	-1.069 ± 0.017	-11.269 ± 0.142	996.969 ± 10.030	2.410 ± 0.082
295	4.90	0.513 ± 0.015	5.413 ± 0.142	966.145 ± 10.031	2.924 ± 0.083
300	-1.00	-0.105 ± 0.015	-1.105 ± 0.142	936.426 ± 10.031	2.819 ± 0.084
305	-1.90	-0.199 ± 0.015	-2.099 ± 0.142	908.806 ± 10.032	2.620 ± 0.086
310	2.70	0.283 ± 0.015	2.983 ± 0.142	878.203 ± 10.032	2.903 ± 0.087

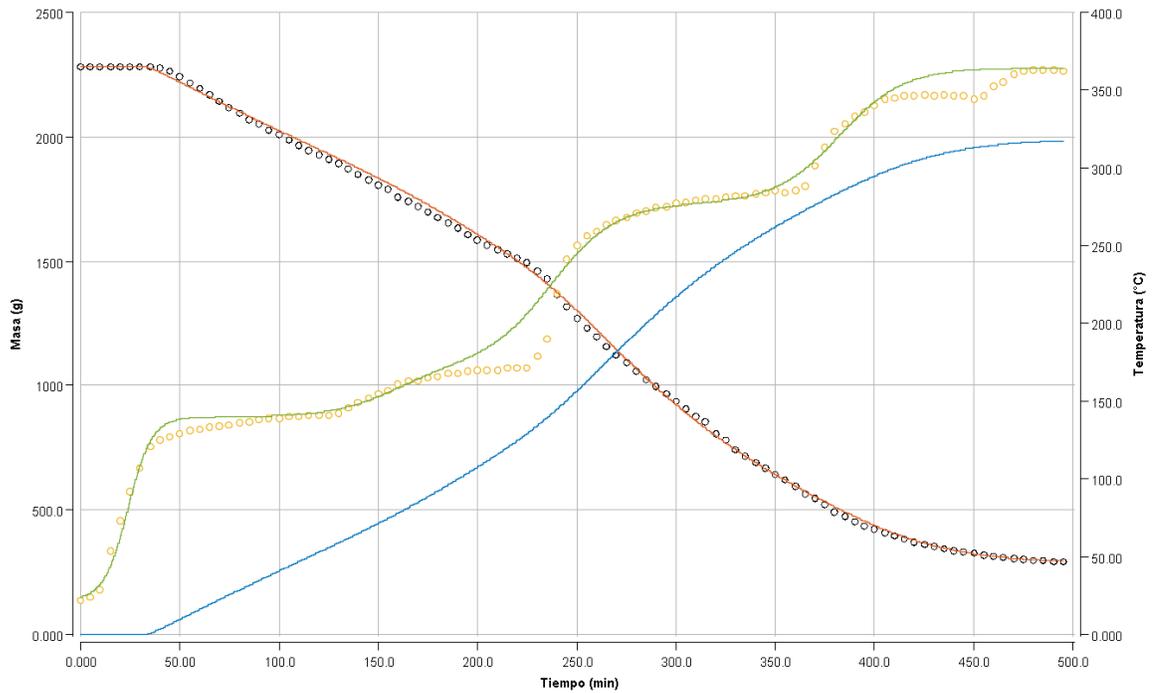
				10.033	
Tiempo (min)	Δm_L (g) (\pm 0.14)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
315	-5.60	-0.587 ± 0.015	-6.187 ± 0.142	853.787 ± 10.034	2.316 ± 0.088
320	21.30	2.232 ± 0.022	23.532 ± 0.143	805.839 ± 10.035	4.548 ± 0.091
325	-19.50	-2.043 ± 0.021	-21.543 ± 0.143	779.435 ± 10.036	2.505 ± 0.093
330	9.80	1.027 ± 0.016	10.827 ± 0.142	742.203 ± 10.037	3.532 ± 0.095
335	-10.40	-1.090 ± 0.017	-11.490 ± 0.142	716.462 ± 10.038	2.442 ± 0.096
340	1.30	0.136 ± 0.015	1.436 ± 0.142	689.284 ± 10.039	2.578 ± 0.097
345	-6.70	-0.702 ± 0.016	-7.402 ± 0.142	669.508 ± 10.040	1.876 ± 0.099
350	4.50	0.472 ± 0.015	4.972 ± 0.142	644.760 ± 10.041	2.347 ± 0.100
355	-1.20	-0.126 ± 0.015	-1.326 ± 0.142	621.339 ± 10.042	2.222 ± 0.101
360	3.10	0.325 ± 0.015	3.425 ± 0.142	594.492 ± 10.043	2.546 ± 0.102
365	-0.10	-0.010 ± 0.015	-0.110 ± 0.142	567.756 ± 10.044	2.536 ± 0.103
370	-6.40	-0.671 ± 0.016	-7.071 ± 0.142	548.091 ± 10.045	1.865 ± 0.104
375	7.00	0.734 ± 0.016	7.734 ± 0.142	520.692 ± 10.046	2.599 ± 0.105
380	-0.90	-0.094 ± 0.015	-0.994 ± 0.142	494.288 ± 10.047	2.505 ± 0.106

Tiempo (min)	Δm_L (g) (\pm 0.14)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
385	-5.50	-0.576 ± 0.015	-6.076 ± 0.142	473.959 ± 10.048	1.928 ± 0.108
390	1.40	0.147 ± 0.015	1.547 ± 0.142	452.085 ± 10.049	2.075 ± 0.109
395	-6.60	-0.692 ± 0.016	-7.292 ± 0.142	437.501 ± 10.050	1.383 ± 0.110
400	1.40	0.147 ± 0.015	1.547 ± 0.142	421.371 ± 10.051	1.530 ± 0.111
405	-2.90	-0.304 ± 0.015	-3.204 ± 0.142	408.445 ± 10.052	1.226 ± 0.112
410	0.20	0.021 ± 0.015	0.221 ± 0.142	395.298 ± 10.053	1.247 ± 0.113
415	-1.10	-0.115 ± 0.015	-1.215 ± 0.142	383.366 ± 10.054	1.132 ± 0.114
420	0.10	0.010 ± 0.015	0.110 ± 0.142	371.324 ± 10.055	1.142 ± 0.115
425	-3.40	-0.356 ± 0.015	-3.756 ± 0.142	363.038 ± 10.056	0.786 ± 0.116
430	0.90	0.094 ± 0.015	0.994 ± 0.142	353.758 ± 10.057	0.880 ± 0.117
435	-1.30	-0.136 ± 0.015	-1.436 ± 0.142	345.914 ± 10.058	0.744 ± 0.117
440	-0.50	-0.052 ± 0.015	-0.552 ± 0.142	338.622 ± 10.059	0.692 ± 0.118
445	-0.70	-0.073 ± 0.015	-0.773 ± 0.142	332.104 ± 10.061	0.618 ± 0.119
450	-0.60	-0.063 ± 0.015	-0.663 ± 0.142	326.249 ± 10.062	0.555 ± 0.120
455	-0.20	-0.021 ± 0.015	-0.221 ± 0.142	320.614 ± 10.062	0.534 ± 0.121

				10.063	
Tiempo (min)	Δm_L (g) (\pm 0.14)	Δm_g (g)	Δm_R (g)	Masa de material sólido dentro del reactor (g)	Masa de producto gaseoso (g)
460	-0.60	-0.063 ± 0.015	-0.663 ± 0.142	315.643 ± 10.064	0.472 ± 0.122
465	0.10	0.010 ± 0.015	0.110 ± 0.142	310.561 ± 10.065	0.482 ± 0.123
470	-0.60	-0.063 ± 0.015	-0.663 ± 0.142	306.141 ± 10.067	0.419 ± 0.124
475	-0.60	-0.063 ± 0.015	-0.663 ± 0.142	302.385 ± 10.068	0.356 ± 0.125
480	-0.80	-0.084 ± 0.015	-0.884 ± 0.142	299.513 ± 10.069	0.272 ± 0.126
485	-0.10	-0.010 ± 0.015	-0.110 ± 0.142	296.751 ± 10.071	0.262 ± 0.127
490	-0.30	-0.031 ± 0.015	-0.331 ± 0.142	294.320 ± 10.073	0.231 ± 0.128
495	-0.10	-0.010 ± 0.015	-0.110 ± 0.142	292.000 ± 10.074	0.220 ± 0.129

- Se muestra los datos calculados para el análisis cinético en el reactor de 7.6 kg. Se muestra el cambio de la masa del producto líquido en función del tiempo, correspondiente a Δm_L ; el cambio de masa del producto gaseoso en función del tiempo, correspondiente a Δm_g ; se muestra el cambio de masa dentro del reactor en función del tiempo, correspondiente a Δm_R ; y se muestra la masa de material sólido dentro del reactor y la masa de gas producido ambos en función del tiempo. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 32 en la sección de datos originales.

Figura No. 32 Predicción de la masa dentro del reactor de 7.6 kg en función del tiempo.



- Se muestra el análisis cinético del reactor de 7.6 kg. Se realizó la siguiente gráfica en el software Berkeley Madonna, se muestra en el eje X el tiempo en minutos, en el eje Y izquierdo la masa en g y en el eje Y derecho la temperatura en °C. La curva anaranjada corresponde a la masa dentro del reactor en función del tiempo, la curva azul corresponde a la formación del producto en función del tiempo y la curva verde corresponde a la temperatura en función del tiempo.

Cuadro No. 80 Constantes de la ecuación de temperatura en función del tiempo para los dos reactores

Constante	Reactor de 100 g	Reactor de 7.6 kg
b	0.961	1.01826
c	13.20422	5.1
d	0.10009	0.66657
te	52.0	6.0088
m	2.69462	0.18076
f	-	-0.0106
g	-	14.9
h	-	16.21109
j	-	-4.01728
p	-	$-3.1031 \cdot 10^{-4}$
q	-	72.0
α	-	-0.032
γ	-	3.82562
Ω	-	17.24498
β	-	-0.027
λ	-	2.40604
μ	-	4.80606

- Las constantes corresponden a las ecuaciones de temperatura en función del tiempo de ambos reactores, que corresponden a las ecuaciones 29 y 30 en la sección de ecuaciones. Se obtuvo las siguientes constantes por medio de un ajuste de datos experimentales con los modelos generados por medio del software Berkeley Madonna.

Cuadro No. 81 Constantes de la ecuación de masa en función del tiempo para los dos reactores

Constante	Reactor de 100 g	Reactor de 7.6 kg
Wf	10.30	292.0
A	0.44524	2.93551
Ea	8305.88549	19150.0
R	8.314	8.314
n	0.54521	0.78

- Las constantes corresponden a las ecuaciones de masa en función del tiempo de ambos reactores, que corresponden a las ecuaciones 31 y 32 en la sección de ecuaciones. Se obtuvo las siguientes constante por medio de un ajuste de datos experimentales con los modelos generados por medio del software Berkeley Madonna.

Cuadro No. 82 Abundancia de los compuestos de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis sin solvente para la muestra 1

Pico	Tiempo de retención (min)	Abundancia (sin solvente) (%)	Compuesto
1	1.266	-	Agua
2	1.32	-	Alcohol etílico
3	1.602	-	Triclorometano
4	2.18	-	Triclorometano
5	38.637	4.97	2-n-heptilfurano
6	41.121	1.76	2-isoamilpirazina
7	45.365	4.66	Ciclohexano, 1,5-dietenil-2,3-dimetil-, (1 alfa, 2 alfa, 3 alfa, 5 beta) -
8	45.515	2.38	2-n-octilfurano
9	47.657	2.49	3-Ciclohexeno-1-etanol, beta, 4-dimetil-
10	47.798	5.49	Ciclohexeno, 3-(1-

Pico	Tiempo de retención (min)	Abundancia (sin solvente) (%)	hexenil)-, (E) Compuesto
11	48.776	9.02	3-hexanol, 2,3-dimetil-
12	49.863	2.07	2,2-dimetil-5-hexen-3-ol
13	50.118	2.49	Oxacyclotridecan-2-ona
14	50.65	36.99	Metil (Z) - 5, 11, 14, 17 - eicosatetraenoato
15	50.787	2.28	9, 12, 15 - ácido octadecatrienoico metilester, (Z,Z,Z) -
16	51.874	0.52	Ciclohexano, 1,2-dietenil-4-(1-metiletildenol)-, cis-
17	52.702	11.81	Ciclohexano, 1-etenil-1-metil-2,4-bis(1-metiletinil)-, (1S-(1 alfa, 2 beta, 4 beta))
18	59.379	2.59	Nonadecano
19	64.328	5.28	Eicosano
20	69.736	5.18	Heptacosano

- Se muestra la abundancia de los componentes de la primera muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis. Se muestra el porcentaje de abundancia calculado sin tomar en cuenta el solvente para cada pico a sus respectivos tiempos de retención. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 34 en la sección de datos calculados.

Cuadro No. 83 Abundancia de los compuestos de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis sin solvente para la muestra 2

Pico	Tiempo de retención (min)	Abundancia (sin solvente) (%)	Compuesto
1	1.265	-	Agua
2	1.324	-	Alcohol etílico
3	1.597	-	Triclorometano
4	38.637	6.99	2-n-heptilfurano
5	47.798	7.42	2-Isoamilpirazina
6	48.799	8.47	3-hexanol, 2,3-dimetil-
7	50.627	45.34	Metil (Z) - 5, 11, 14, 17 - eicosatetraenoato
8	52.701	15.68	Ciclohexano, 1-etenil-1-metil-2,4-bis(1-metiletinil)-, (1S-(1 alfa, 2 beta, 4 beta))
9	64.323	7.84	Nonadecano
10	69.704	8.26	Eicosano

- Se muestra la abundancia de los componentes de la segunda muestra de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis. Se muestra el porcentaje de abundancia calculado sin tomar en cuenta el solvente para cada pico a sus respectivos tiempos de retención. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 34 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 84 Análisis estadístico del poder calorífico en base húmeda del producto sólido de pirólisis

Media (kJ/kg)	Desviación estándar (kJ/kg)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (kJ/kg)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (kJ/kg)	Coefficiente de variación (%)
29699 ± 0.28	1411.13	27320.03	32077.97	4.75

- Se muestra el análisis estadístico del poder calorífico en base húmeda del producto sólido de pirólisis. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y

para 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 35 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 85 Cálculo del poder calorífico del producto líquido en base húmeda de pirólisis para la fracción ligera y pesada

Fracción	Corrida	Fracción másica de ácido benzoico (kg ácido benzoico/kg)	Fracción másica del producto líquido (kg líquido/kg)	Poder calorífico de la mezcla (kJ/kg) (\pm 0.5 kJ/kg)	Poder calorífico del ácido benzoico (kJ/kg)	Poder calorífico del producto líquido (kJ/kg)
Ligera	1	0.497 \pm 0.0003	0.503 \pm 0.0004	13553	26432	850.93 \pm 0.76
	2	0.377 \pm 0.0003	0.623 \pm 0.0004	11237	26432	2042.28 \pm 2.08
	3	0.565 \pm 0.0002	0.435 \pm 0.0003	15485	26432	1256.34 \pm 0.97
Pesada	1	0.608 \pm 0.0002	0.392 \pm 0.0002	22450	26432	16285.43 \pm 11.55
	2	0.522 \pm 0.0003	0.478 \pm 0.0003	24352	26432	22076.03 \pm 18.69
	3	0.506 \pm 0.0002	0.494 \pm 0.0003	28152	26432	29917.23 \pm 21.45

- Se muestra el cálculo del poder calorífico en base húmeda del producto líquido de pirólisis en base a las fracciones másicas de ácido benzoico y el producto líquido. Se utilizó el poder calorífico del ácido benzoico a condiciones estándar de 26,432 kJ/kg (Engineering ToolBox, 2017). Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 36 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 86 Análisis estadístico del poder calorífico en base húmeda del producto líquido de pirólisis para la fracción ligera y pesada

Fracción	Media (kJ/kg)	Desviación estándar (kJ/kg)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (kJ/kg)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (kJ/kg)	Coefficiente de variación (%)
Ligera	1383.18 ± 0.80	605.72	362.02	2404.34	43.79
Pesada	22759.56 ± 10.24	6841.56	11225.63	34293.49	30.06

- Se muestra el análisis estadístico del poder calorífico en base húmeda del producto líquido de pirólisis tanto para la fracción ligera como para la fracción pesada. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 2 grados de libertad de 2.920.

Cuadro No. 87 Porcentaje de humedad y análisis estadístico de las muestras del producto sólido de pirólisis

Crisol	Porcentaje de humedad (%)	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor inferior (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
1	2.21 ± 0.000016	2.24 ± 0.000012	1.81	0.11	4.37	80.87
2	4.60 ± 0.000040					
3	0.19 ± 0.000002					
4	1.92 ± 0.000016					

- Se muestra el porcentaje de humedad del producto sólido y su respectivo análisis estadístico. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 38 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 88 Porcentaje de cenizas y análisis estadístico de las muestras del producto sólido de pirólisis

Crisol	Porcentaje de cenizas (%)	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor inferior (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coficiente de variación (%)
1	9.95 ± 0.00008	10.50 ± 0.00005	0.66	9.72	11.27	6.27
2	11.39 ± 0.00011					
3	10.61 ± 0.00009					
4	10.05 ± 0.00009					

- Se muestra el porcentaje de cenizas del producto sólido y su respectivo análisis estadístico. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 39 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 89 Porcentaje de material volátil y análisis estadístico de las muestras de producto sólido de pirólisis

Crisol	Porcentaje de masa perdida (%)	Porcentaje de material volátil (%)	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor inferior (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coefficiente de variación (%)
1	24.99 ± 0.00019	22.78 ± 0.00019	24.38 ± 0.00011	3.13	20.70	28.06	12.83
2	25.46 ± 0.00022	20.86 ± 0.00023					
3	27.95 ± 0.00022	27.76 ± 0.00022					
4	28.06 ± 0.00024	26.11 ± 0.00024					

- Se muestra el porcentaje de material volátil del producto sólido y su respectivo análisis estadístico. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 40 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 90 Porcentaje de carbono fijo y análisis estadístico de las muestras de producto sólido de pirólisis

Crisol	Porcentaje de carbono fijo (%)	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coficiente de variación (%)
1	65.05 ± 0.00020	62.89 ± 0.00012	1.62	60.98	64.79	2.57
2	63.16 ± 0.00025					
3	61.44 ± 0.00024					
4	61.89 ± 0.00026					

- Se muestra el porcentaje de carbono fijo del producto sólido y su respectivo análisis estadístico. Se utilizó un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 3 grados de libertad de 2.353.

Cuadro No. 91 Densidad de bulto aireada y análisis estadístico del producto sólido de pirólisis

Corrida	Densidad de bulto aireada (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (kg/m ³)	Coficiente de variación (%)
1	214.86 ± 1.98	237.61 ± 0.96	19.34	214.85	260.37	8.14
2	228.26 ± 1.65					
3	252.56 ± 2.07					
4	254.76 ± 1.93					

- Se muestra los datos calculados de la densidad de bulto aireada del producto sólido en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 41 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 92 Densidad de bulto compacta y análisis estadístico del producto sólido de pirólisis

Corrida	Densidad de bulto compacta (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
1	265.00 ± 2.77	268.87 ± 1.18	6.00	261.80	275.93	2.23
2	262.50 ± 2.06					
3	273.61 ± 2.35					
4	274.36 ± 2.18					

- Se muestra los datos calculados de la densidad de bulto compacta del producto sólido en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el cuadro no. 42 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 93 Densidad de bulto de trabajo y análisis estadístico del producto sólido de pirólisis

Corrida	Densidad de bulto de trabajo (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
1	224.35 ± 3.13	241.86 ± 1.43	15.77	223.30	260.41	6.52
2	232.73 ± 2.48					
3	254.18 ± 3.02					
4	256.16 ± 2.81					

- Se muestra los datos calculados de la densidad de bulto de trabajo del producto sólido en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353.

Cuadro No. 94 Densidad y análisis estadístico del producto líquido de pirólisis

Corrida	Densidad (kg/m ³)	Media (kg/m ³)	Desviación estándar (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (kg/m ³)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (kg/m ³)	Coefficiente de variación (%)
1	1001.67 ± 8.51	1693.49 ± 4.61	492.96	1113.52	2273.46	29.11
2	2145.98 ± 12.39					
3	1905.45 ± 8.71					
4	1720.86 ± 6.23					

- Se muestra los datos calculados de la densidad del producto líquido en cuadruplicado. Además, se muestra el análisis estadístico, utilizando un valor de t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y con 3 grados de libertad de 2.353. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 43 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 95 Análisis estadístico de la viscosidad dinámica del producto líquido de pirólisis

Media (mPas)	Desviación estándar (mPas)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (mPas)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (mPas)	Coefficiente de variación (%)
11.43 ± 0.02	1.78	10.12	12.74	15.57

- Se muestra el análisis estadístico de la viscosidad del producto líquido de pirólisis. Se utilizó un valor t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 6 grados de libertad de 1.9432. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro No. 44 en la sección de datos originales.

Cuadro No. 96 Viscosidad cinemática del producto líquido de pirólisis

Corrida	Viscosidad cinemática (cSt)	Media (cSt)	Desviación estándar (cSt)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (cSt)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (cSt)	Coficiente de variación (%)
1	6.023 ± 0.034	6.748 ± 0.01	1.051	5.977	7.520	15.57
2	7.558 ± 0.036					
3	7.204 ± 0.035					
4	5.669 ± 0.033					
5	5.315 ± 0.033					
6	7.913 ± 0.037					
7	7.558 ± 0.036					

- Se muestra los datos calculados de la viscosidad cinemática del producto líquido de pirólisis. Se utilizó el valor obtenido de la densidad promedio para el cálculo realizado. Se muestra, además, el análisis estadístico de la viscosidad cinemática. Se utilizó un valor t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 6 grados de libertad de 1.9432.

Cuadro No. 97 Porcentaje de nitrógeno y análisis estadístico para el análisis de Kjeldahl del producto sólido de pirólisis

Muestra	Porcentaje de nitrógeno (%)	Media (%)	Desviación estándar (%)	Intervalo de confianza al 95% valor mínimo (%)	Intervalo de confianza al 95% valor superior (%)	Coficiente de variación (%)
1	2.31 ± 0.03	2.33 ± 0.01	0.03	2.30	2.36	1.48
2	2.31 ± 0.04					
3	2.38 ± 0.03					
4	2.30 ± 0.03					
5	2.36 ± 0.03					
6	2.30 ± 0.03					

- Se muestra el porcentaje de nitrógeno del análisis Kjeldahl para el producto sólido de pirólisis con su respectivo análisis estadístico. Se utilizó un valor t student para el cálculo del intervalo de confianza al 95% y para 5 grados de libertad de 2.1318. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro no. 45 en la sección de datos originales.

D. Ecuaciones

Ecuación No. 4 Volumen del recipiente utilizado para la medición de la densidad de bulfo

$$V_{recipiente} = \pi * \left(\frac{D_{recipiente}}{2}\right)^2 * h_{recipiente}$$

Ecuación no. 5 densidad de bulfo

$$DB_{A,C} = \frac{m_{material}}{V_{recipiente}}$$

Ecuación No. 6 Densidad de bulfo de trabajo

$$DBT = C * (DBC - DBA) + DBA$$

Donde:

DBA = densidad de bulfo aireada

DBC = densidad de bulfo compacta

DBT = densidad de bulfo de trabajo

Ecuación No. 7 Factor de compresibilidad de sólidos para la densidad de bulto de trabajo

$$C = \frac{DBC - DBA}{DBC}$$

Ecuación No. 8 Diámetro de partícula

$$Dp = \frac{l}{n}$$

Donde:

Dp = diámetro de partícula

l = longitud total de la materia prima

n = número de muestras utilizadas

Ecuación No. 9 Porcentaje de humedad en el proceso de secado por medio del horno deshidratador

$$\% \text{ Humedad}_{t=x \text{ min}} = \frac{m_{H_2O,t=x \text{ min}}}{m_i} * 100\%$$

Donde:

$m_{H_2O,t=x \text{ min}}$ = masa de agua luego de x minutos de secado

$\% \text{ Humedad}_{t=x \text{ min}}$ = porcentaje de humedad luego de x minutos de secado

m_i = masa inicial de la materia prima

Ecuación No. 10 Masa inicial de agua en la muestra

$$m_{H_2O,inicial} = m_i * \% \text{ Humedad}_{inicial}$$

Donde:

$\% \text{ Humedad}_{inicial}$ = porcentaje de humedad inicial en la materia prima

$m_{H_2O,inicial}$ = masa de agua inicial en la materia prima

Ecuación No. 11 Masa de la materia prima seca utilizada para el secado

$$m_{material \text{ seco}} = m_i - m_{H_2O,inicial}$$

Donde:

$m_{material \text{ seco}}$ = masa de la materia prima seca

Ecuación No. 12 Masa de agua en un tiempo determinado durante el proceso de secado

$$m_{H_2O,t=x \text{ min}} = m_{t=x \text{ min}} - m_{material \text{ seco}}$$

Donde:

$m_{t=x \text{ min}}$ = masa de la materia prima luego de x minutos de secado

Ecuación No. 13 Eficacia de molino

$$\eta_{\text{molino}} = \frac{m_{\text{molido}}}{m_{\text{alimentado}}} * 100\%$$

Donde:

$m_{\text{alimentado}}$ = masa de la materia prima a moler

m_{molido} = masa de la materia prima luego de la molienda

η_{molino} = eficacia del molino

Ecuación No. 14 Porcentaje de material en una malla determinada

$$\% \text{ en malla}_i = \frac{m_{\text{malla},i}}{m_T} * 100\%$$

Donde:

$\% \text{ en malla}_i$ = porcentaje que se encuentra en la malla mesh i

m_T = masa total alimentada al tamizaje

$m_{\text{malla},i}$ = masa en la malla i

Ecuación No. 15 Porcentaje de material que atraviesa la malla inicial del sistema de tamizaje

$$\% \text{ que pasa por malla}_{\text{inicial}} = 100\% - \% \text{ en malla}_{\text{inicial}}$$

Donde:

$\% \text{ que pasa por malla}_{\text{inicial}}$ = porcentaje que pasa por la primera malla

$\% \text{ en malla}_{\text{inicial}}$ = porcentaje en la primera malla

Ecuación No. 16 Porcentaje de material que atraviesa una malla determinada

$$\% \text{ que pasa por malla}_i = \% \text{ que pasa por malla}_{i+1} - \% \text{ en malla}_i$$

Donde:

$\% \text{ que pasa por malla}_i$ = porcentaje que pasa por la malla i

$\% \text{ que pasa por malla}_{i+1}$

= porcentaje que pasa por la malla con mesh inferior al que se desea calcular

Ecuación No. 17 Balance de masa del proceso de pirólisis

$$m_{\text{alim}} = m_{\text{char}} + m_{\text{liq}} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{gas}}$$

Donde:

m_{alim} = masa alimentada al reactor

m_{char} = masa de producto sólido

$m_{liq} = \text{masa de producto líquido}$

$m_{H_2O} = \text{masa de agua}$

$m_{gas} = \text{masa de gas}$

Ecuación No. 18 Rendimiento de los productos de pirólisis

$$\% \text{ producto} = \frac{m_{prod}}{m_{alim}} * 100\%$$

Donde:

$\% \text{ producto} = \text{rendimiento de producto de pirólisis (sólido, líquido, } H_2O \text{ o gas)}$

$m_{prod} = \text{masa del producto (sólido, líquido, } H_2O \text{ o gas)}$

$m_{alim} = \text{masa de alimentación al reactor}$

Ecuación No. 19 Conversión de los productos de pirólisis

$$\% \text{ Conversión} = \frac{m_{alim} - m_{sol}}{m_{alim}} * 100\%$$

Donde:

$\% \text{ Conversión} = \text{porcentaje de conversión de la biomasa}$

$m_{alim} = \text{masa de la alimentación al reactor}$

$m_{sol} = \text{masa de producto sólido}$

Ecuación No. 20 Masa de alimentación seca en el proceso de pirólisis

$$m_{alim \text{ seca}} = m_{alim} - m_{H_2O}$$

Donde:

$m_{alim \text{ seca}} = \text{masa de la alimentación en base seca}$

$m_{alim} = \text{masa de la alimentación}$

$m_{H_2O} = \text{masa de agua}$

Ecuación No. 21 Cambio de masa global del producto gaseoso en el proceso de pirólisis

$$\Delta m_{gas \text{ global}} = m_{gas \text{ final}} - m_{gas \text{ inicial}}$$

Donde:

$\Delta m_{gas \text{ global}} = \text{cambio de masa de producto gaseoso global del proceso}$

$m_{gas \text{ final}} = \text{masa final de producto gaseoso obtenido del balance de masa}$

$m_{gas \text{ inicial}} = \text{masa inicial de producto gaseoso}$

Ecuación No. 22 Cambio de masa global del producto líquido en el proceso de pirólisis

$$\Delta m_{\text{líquido global}} = m_{\text{líquido final}} - m_{\text{líquido inicial}}$$

Donde:

$\Delta m_{\text{líquido global}}$ = cambio de masa de producto líquido global del proceso

$m_{\text{líquido final}}$ = masa final de producto líquido

$m_{\text{líquido inicial}}$ = masa inicial de producto líquido

Ecuación No. 23 Constante de relación de formación de producto gaseoso con respecto al producto líquido

$$k = \frac{\Delta m_{\text{gas global}}}{\Delta m_{\text{líquido global}}}$$

Donde:

k

= constante de la relación de formación de producto gaseoso con respecto al producto líquido

Ecuación No. 24 Cambio de masa instantáneo del producto líquido

$$\Delta m_L = m_{L_2} - m_{L_1}$$

Donde:

Δm_L = cambio de masa del producto líquido instantáneo

m_{L_1} = masa de producto líquido en el tiempo 1

m_{L_2} = masa de producto líquido en el tiempo 2

Ecuación No. 25 Cambio de masa instantáneo del producto gaseoso utilizando la constante de relación de productos

$$\Delta m_g = k * \Delta m_L$$

Donde:

Δm_g = cambio de masa del producto gaseoso instantáneo

Ecuación No. 26 Cambio de masa instantáneo dentro del reactor

$$\Delta m_R = \Delta m_L + \Delta m_g$$

Donde:

Δm_R = cambio de masa dentro del reactor instantáneo

Ecuación No. 27 Cambio de masa instantáneo del producto gaseoso

$$\Delta m_g = m_{g2} - m_{g1}$$

Donde:

Δm_g = cambio de masa del producto gaseoso instantáneo

m_{g1} = masa de producto gaseoso en el tiempo 1

m_{g2} = masa de producto gaseoso en el tiempo 2

Ecuación No. 28 Masa instantánea en el punto 2 dentro del reactor

$$m_{s2} = m_{s1} - m_{L2} - m_{g2}$$

Donde:

m_{s1} = masa dentro del reactor en el tiempo 1

m_{s2} = masa dentro del reactor en el tiempo 2

Ecuación No. 29 Ecuación de temperatura en función del tiempo para el reactor de 100 g

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{b + c * e^{\frac{d-t}{m}}}$$

Donde:

T = Temperatura dentro del reactor

T_1 = Temperatura en el instante 1

T_2 = Temperatura en el instante 2

t = tiempo

b, c, d, te, m = constantes arbitrarias

Ecuación No. 30 Ecuación de temperatura en función del tiempo para el reactor de 7.6 kg

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{b + c * e^{\frac{d-t}{m}}} + \frac{f}{p + g * e^{\frac{T_3 - T_2 - t}{q} \frac{t}{h}}} + \frac{\alpha}{p + \gamma * e^{\frac{T_4 - T_3 - t}{\Omega} \frac{t}{h}}} + \frac{\beta}{p + \lambda * e^{\frac{T_5 - T_4 - t}{\mu} \frac{t}{h}}}$$

Donde:

T = Temperatura dentro del reactor en función del tiempo

T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 = Temperatura inicial y final de una rampa de temperatura

t = tiempo

$b, c, d, te, m, f, g, h, j, p, q, \alpha, \gamma, \Omega, \beta, \lambda, \mu$ = constantes arbitrarias

Ecuación No. 31 Ecuación de masa en función del tiempo para el reactor de 100 g

$$r_w = \begin{cases} 0, T < 115^\circ\text{C} \\ k * (W - W_f)^n, T \geq 115^\circ\text{C} \end{cases}$$

$$k = A * e^{\frac{-Ea}{R*T}}$$

Donde:

r_w = velocidad de cambio de masa del reactor en función del tiempo

W = masa instantánea dentro del reactor

W_f = masa final dentro del reactor

n = orden de reacción

k = constante de Arrhenius

A = constante de frecuencia

Ea = energía de activación

R = constante de los gases ideales

T = Temperatura (ec. de Boltzmann modificada)

Ecuación No. 32 Ecuación de masa en función del tiempo para el reactor de 7.6 kg

$$r_w = \begin{cases} 0, T < 120^\circ C \\ k * (W - W_f)^n, T \geq 120^\circ C \end{cases}$$

$$k = A * e^{\frac{-Ea}{R*T}}$$

Donde:

r_w = velocidad de cambio de masa del reactor en función del tiempo

W = masa instantánea dentro del reactor

W_f = masa final dentro del reactor

n = orden de reacción

k = constante de Arrhenius

A = constante de frecuencia

Ea = energía de activación

R = constante de los gases ideales

T = Temperatura (ec. no. 3)

Ecuación No. 33 Flujo másico de agua en el condensador

$$\dot{m}_{H_2O} = q_{H_2O} * \rho_{H_2O} @ 22^\circ C$$

Donde:

Donde.

\dot{m}_{H_2O} = flujo másico de agua de enfriamiento

q_{H_2O} = caudal de agua de enfriamiento

$$\rho_{H_2O @ 22^\circ C} = \text{densidad del agua a } 22^\circ C$$

Ecuación No. 34 Masa de agua de enfriamiento utilizada

$$m_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} * t_{op}$$

Donde:

$$t_{op} = \text{tiempo de operación del proceso de pirólisis}$$

$$m_{H_2O} = \text{masa de agua de enfriamiento utilizada en la pirólisis}$$

Ecuación No. 35 Porcentaje de aire en exceso en un proceso de combustión

$$\% \text{ aire en exceso} = \left| \frac{\frac{m_{aire \text{ teo}}}{m_{propano \text{ teo}}} - \frac{m_{aire}}{m_{propano}}}{\frac{m_{aire \text{ teo}}}{m_{propano \text{ teo}}}} \right| * 100\%$$

Donde:

$$m_{aire \text{ teo}} = \text{masa de aire teórico para lograr una combustión completa}$$

$$m_{propano \text{ teo}} = \text{masa de propano teórico para lograr una combustión completa}$$

$$\% \text{ aire en exceso} = \text{porcentaje de aire en exceso en la combustión}$$

$$m_{aire} = \text{masa de aire real para la combustión incompleta}$$

$$m_{propano} = \text{masa de propano real para la combustión incompleta}$$

Ecuación No. 36 Masa de propano que reacciona durante la combustión

$$m_{propano \text{ rxn}} = \eta_{\text{combustión}} * m_{propano}$$

Donde:

$$m_{propano \text{ rxn}} = \text{masa de propano que reacciona en la combustión}$$

$$\eta_{\text{combustión}} = \text{eficiencia de la combustión}$$

Ecuación No. 37 Energía en forma de calor proporcionada por la mufla

$$Q = \dot{Q} * t$$

Donde:

$$Q = \text{calor añadido por la mufla al reactor de pirólisis en el proceso}$$

$$\dot{Q} = \text{Potencia de la mufla}$$

$$t = \text{tiempo de operación de pirólisis}$$

Ecuación No. 38 Energía en forma de calor proporcionada por la combustión de gas propano

$$Q_{propano} = m_{propano} * P.C._{propano}$$

Donde:

$$Q_{\text{propano}} = \text{calor añadido al reactor por el propano}$$

$$m_{\text{propano}} = \text{masa de propano que reacciona y combustiona}$$

$$P.C._{\text{propano}} = \text{poder calorífico del propano}$$

Ecuación No. 39 Calor retirado en el condensador

$$Q_{\text{H}_2\text{O cond.}} = m_{\text{H}_2\text{O}} * C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} * \Delta T$$

Donde:

$$Q_{\text{H}_2\text{O cond.}} = \text{calor removido en el condensador por el agua}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \text{masa de agua obtenida del reactor}$$

$$C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} = \text{capacidad calorífica del agua}$$

$$\Delta T = \text{cambio de temperatura del agua del condensador}$$

Ecuación No. 40 Calor transferido por la mezcla gaseosa en el condensador

$$Q_{\text{gas+vapor}} = m_{\text{H}_2\text{O}} * \lambda_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{ác.acético}} * \lambda_{\text{ác.acético}} + m_{\text{fracción pesada}} * \lambda_{\text{fracción pesada}}$$

Donde:

$$Q_{\text{gas+vapor}} = \text{calor que cede la mezcla de gases salientes del reactor}$$

$$\lambda = \text{calor latente de vaporización del agua, ácido acético y la fracción pesada}$$

$$m = \text{masa de agua, ácido acético y la fracción pesada}$$

Ecuación No. 41 Energía en forma de calor proporcionada por el producto sólido

$$Q_{\text{sol}} = m_{\text{sol}} * P.C._{\text{sol}}$$

Donde:

$$Q = \text{Energía en forma de calor proporcionada por los productos de pirólisis}$$

$$m_{\text{sol}} = \text{masa de producto sólido}$$

$$m_{\text{ligero}} = \text{masa de la fracción ligera del producto líquido}$$

Ecuación No. 42 Energía en forma de calor proporcionada por el producto líquido

$$Q_{\text{liq}} = m_{\text{ligero}} * P.C._{\text{ligero}} + m_{\text{pesado}} * P.C._{\text{pesado}}$$

Donde:

$$Q = \text{Energía en forma de calor proporcionada por los productos de pirólisis}$$

$$m_{\text{ligero}} = \text{masa de la fracción ligera del producto líquido}$$

$$m_{\text{pesada}} = \text{masa de la fracción pesada del producto líquido}$$

$$P.C. = \text{poder calorífico}$$

Ecuación No. 43 Energía en forma de calor proporcionada por el producto gaseoso

$$Q_{gas} = m_{H_2} * P.C._{H_2} + m_{CO} * P.C._{CO} + m_{CH_4} * P.C._{CH_4}$$

Donde:

Q = Energía en forma de calor proporcionada por los productos de pirólisis

m_{H_2} = masa de hidrógeno en el producto gaseoso

m_{CO} = masa de monóxido de carbono en el producto gaseoso

m_{CH_4} = masa de metano en el producto gaseoso

$P.C.$ = poder calorífico

Ecuación No. 44 Energía en forma de calor proporcionada por la materia prima

$$Q_{alim} = (1 - \%H_{molido})m_{alim} * P.C._{alim}$$

Donde:

Q_{alim} = energía en forma de calor proporcionada por la alimentación

m_{alim} = masa de alimentación al reactor

$P.C._{alim}$ = poder calorífico de la semilla de aguacate

$\%H_{molido}$ = porcentaje de humedad de la materia prima molida

Ecuación No. 45 Porcentaje de abundancia de los compuestos obtenidos de cromatografía sin solvente

$$\% \text{ Abundancia} = \frac{\% \text{ Área compuesto } i}{\sum \% \text{ Áreas sin solvente}} * 100\%$$

Donde:

$\% \text{ Abundancia}$ = abundancia de un componente sin tomar en cuenta el solvente

$\% \text{ Área compuesto } i$ = porcentaje de área bajo la curva para el compuesto de interés

$\sum \% \text{ Áreas sin solvente}$

= sumatoria de áreas bajo la curva de todos los componentes sin tomar en cuenta el solvente

Ecuación No. 46 Poder calorífico del producto líquido

$$P.C._{mezcla} = x_{ác.benzoico} * P.C._{ác.benzoico} + x_{líquido} * P.C._{líquido}$$

Donde:

$P.C._{mezcla}$ = poder calorífico de la mezcla

$P.C._{ác.benzoico}$ = poder calorífico del ácido benzoico

$P.C._{líquido}$ = poder calorífico del producto líquido

$x_{ác.benzoico}$ = fracción másica del ácido benzoico

$x_{\text{líquido}}$ = fracción másico del producto líquido

Ecuación No. 47 Porcentaje de humedad en el producto sólido

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{W_i - W_f}{W_i - W_c} \right) * 100\%$$

Donde:

$\% \text{ Humedad}$ = porcentaje de humedad en el producto sólido

W_i = masa del crisol con la muestra inicial

W_c = masa del crisol

W_f = masa final del crisol con la muestra

Ecuación No. 48 Porcentaje de cenizas en el producto sólido

$$\% \text{ Cenizas} = \left(\frac{W_f - W_c}{W_i - W_c} \right) * 100\%$$

Donde:

W_i = masa del crisol con la muestra inicial

W_c = masa del crisol

W_f = masa final del crisol con la muestra

Ecuación No. 49 Porcentaje de masa perdida en el análisis de material volátil

$$\% A = \left(\frac{W_i - W_f}{W_i - W_c} \right) * 100\%$$

Donde:

$\% A$ = porcentaje de masa perdida

W_c = masa del crisol

W_i = masa inicial del crisol con la muestra

W_f = masa final del crisol con la muestra

Ecuación No. 50 Porcentaje de material volátil en el producto sólido

$$\% \text{ material volátil} = \% A - \% \text{ Humedad}$$

Donde:

$\% \text{ material volátil}$ = porcentaje de material volátil en el producto sólido

Ecuación No. 51 Porcentaje de carbono fijo en el producto sólido

$$\% C = 100\% - \% \text{ Humedad} - \% \text{ Cenizas} - \% \text{ Material volátil}$$

Donde:

% C = porcentaje de carbono fijo en el producto sólido

% Humedad = porcentaje de humedad en el producto sólido

% Cenizas = porcentaje de cenizas en el producto sólido

% Material volátil = porcentaje de material volátil en el producto sólido

Ecuación No. 52 Densidad del producto líquido

$$\rho = \frac{m_L}{V}$$

Donde:

ρ = densidad del producto líquido

m_L = masa de producto líquido

V = volumen ocupado por el producto líquido

Ecuación No. 53 Viscosidad cinemática del producto líquido

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

ν = viscosidad cinemática

μ = viscosidad dinámica

ρ = densidad del producto líquido

Ecuación No. 54 Porcentaje de nitrógeno en el producto sólido

$$\% N = V_{HCl} * \frac{[HCl]}{1000} * \frac{14.006 \text{ g N}}{1 \text{ mol N}} * \frac{1}{m_{mx}} * 100\%$$

Donde:

% N = porcentaje de nitrógeno en el producto sólido

[HCl] = concentración de la solución de ácido clorhídrico

m_{mx} = masa de la muestra de producto sólido

Ecuación No. 55 Media muestral

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Donde:

\bar{x} = valor promedio

$x_{1,2,\dots,n}$ = valor de la propiedad medida o calculada

n = número de unidades/repeticiones

Ecuación No. 56 Desviación estándar muestral

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ = desviación estándar muestral
 x_i = valor de la observación/medición
 \bar{x} = valor promedio
 n = número de observaciones

Ecuación No. 57 Intervalo de confianza al 95%

$$I.C. = \bar{x} \pm t_{student} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

$I.C.$ = Intervalo de confianza al 95%
 $I.C._{min}$ = Intervalo de confianza al 95% valor mínimo
 $I.C._{sup}$ = Intervalo de confianza al 95% valor superior
 \bar{x} = valor promedio
 $t_{student}$ = valor de t student para una cola
 σ = Desviación estándar muestral
 n = número de observaciones

Ecuación No. 58 Prueba Q

$$Q = \left| \frac{x_c - x_v}{W} \right|$$

Donde:

x_c = valor dudoso de la serie de datos
 x_v = valor cercano al valor dudoso
 W = rango de la serie de datos
 Q_{crit} = valor de Q crítico al 95% de confianza
 Q = Valor de la prueba Q

Ecuación No. 59 Coeficiente de variación

$$C.V. = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100\%$$

Donde:

$C.V. = \text{coeficiente de variación}$
 $\sigma = \text{desviación estándar muestral}$
 $\bar{x} = \text{valor promedio}$

Ecuación No. 60 Cálculo de incertidumbres para sumas y restas

$$S_y = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + \dots + S_n^2}$$

Donde:

$S_y = \text{Incertidumbre del valor calculado por suma o resta}$

$S_{a,b,\dots,n} = \text{Incertidumbre de los valores utilizados en el cálculo}$

Ecuación No. 61 Cálculo de incertidumbres para multiplicaciones y divisiones

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \dots + \left(\frac{S_n}{n}\right)^2}$$

Donde:

$S_y = \text{Incertidumbre del valor calculado por multiplicación o división}$

$y = \text{valor que se busca determinar su incertidumbre}$

$S_{a,b,\dots,n} = \text{Incertidumbre de los valores utilizados en el cálculo}$

$a, b, \dots, n = \text{valores utilizados en el cálculo}$

E. Cálculos de muestra

Cálculo No. 1 Cálculo de densidad de bulto aireada y compacta de la materia prima

$$D_{\text{recipiente}} = 33 \text{ cm} = 0.33 \text{ m}$$

$$m_{\text{materia prima}} = 1.8594 \text{ kg}$$

$$h = 14 \text{ cm} = 0.14 \text{ m}$$

$$V_{\text{recipiente}} = \pi * \left(\frac{0.33 \text{ m}}{2}\right)^2 * 0.14 \text{ m} = 0.0119742 \text{ m}^3$$

$$DBA = \frac{m_{\text{materia prima}}}{V_{\text{recipiente}}} = \frac{1.8594 \text{ kg}}{0.0119742 \text{ m}^3} = 155.284 \text{ kg/m}^3$$

- Se realizó este cálculo anterior para determinar la densidad de bulto tanto aireada como compacta correspondiente a la materia prima, siendo cáscara y semilla de aguacate. El cálculo anterior muestra el cálculo correspondiente de la densidad de bulto aireada para la primera corrida. Se calcula de igual manera la densidad de bulto compacta variando la altura medida

en el cálculo del volumen del recipiente. Se utilizó las ecuaciones 4 y 5 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 2 Cálculo de densidad de bulto de trabajo

$$DBT = \left(\frac{(197.643 - 155.284) \frac{kg}{m^3}}{197.643 \frac{kg}{m^3}} \right) * \left(197.643 \frac{kg}{m^3} - 155.284 \frac{kg}{m^3} \right) + 155.284 \frac{kg}{m^3}$$

$$DBT = 164.359 \frac{kg}{m^3}$$

- Se realizó este cálculo anterior para determinar la densidad de bulto de trabajo de la materia prima previo a la molienda, de la materia prima molida y del producto sólido obtenido. Se utilizó las ecuaciones 6 y 7 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 3 Diámetro de partícula

$$D_p = \frac{34.5 \text{ cm}}{10 \text{ cáscaras}} = 3.45 \text{ cm/cáscara}$$

- Se realizó este cálculo anterior para determinar el diámetro de partícula correspondiente para la cáscara y la semilla del aguacate. Se utilizó la ecuación 8 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 4 Porcentaje de humedad en el proceso de secado por medio de un horno deshidratador

$$m_i = 0.6212 \text{ g}$$

$$m_{H_2O, inicial} = (0.6212 \text{ g}) * 0.7745 = 0.4811 \text{ g } H_2O$$

$$m_{material seco} = (0.6212 - 0.4811) \text{ g } H_2O = 0.1401 \text{ g cáscara seca}$$

$$m_{H_2O, t=30 \text{ min}} = (0.4658 - 0.1401) \text{ g} = 0.3257 \text{ g } H_2O$$

$$\% Humedad_{t=30 \text{ min}} = \frac{0.3257 \text{ g } H_2O}{0.6212 \text{ g}} * 100\% = 52.43\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de humedad durante el proceso de secado por medio de un horno deshidratador. Se realizó este cálculo tanto para el secado de cáscara como de semilla de aguacate durante el proceso de secado. Se utilizó las ecuaciones 9 a 12 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 5 Eficacia de molino

$$m_{alimentado} = 7.92 \text{ kg materia prima}$$

$$m_{molido} = 7.32 \text{ kg materia prima molida}$$

$$\eta_{molino} = \frac{7.32 \text{ kg}}{7.92 \text{ kg}} * 100\% = 92.42\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la eficacia del molino utilizado en el proceso de molienda. Se muestra el cálculo de eficacia de la trituradora de cuchillas para la materia prima sin secar. Se realizó este cálculo para el molino de discos y para la trituradora de cuchillas. Se utilizó la ecuación 13 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 6 Análisis granulométrico

$$m_T = 1.35 \text{ kg}$$

$$m_{malla,20} = 1.17 \text{ kg}$$

$$m_{malla,28} = 0.09 \text{ kg}$$

$$\% \text{ en malla}_{20} = \frac{1.17 \text{ kg}}{1.35 \text{ kg}} * 100\% = 86.67\%$$

$$\% \text{ en malla}_{28} = \frac{0.09 \text{ kg}}{1.35 \text{ kg}} * 100\% = 6.67\%$$

$$\% \text{ que pasa por malla}_{20} = 100\% - 86.67\% = 13.33\%$$

$$\% \text{ que pasa por malla}_{28} = 13.33\% - 6.67\% = 6.67\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de material en cada malla de la tamizadora, así como el porcentaje de materia que pasa por cada malla. Este cálculo se realizó para el análisis granulométrico del molino de discos y de la trituradora de cuchillas. Se utilizó las ecuaciones 14 a 16 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 7 Densidad de bulto aireada y compacta para el material molido y el producto sólido de pirólisis

$$m_{sol} = 10.9 \text{ g}$$

$$V_{ocupado} = 26 \text{ mL}$$

$$DBA = \frac{10.9 \text{ g}}{26 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = 419.23 \text{ kg/m}^3$$

Donde:

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la densidad de bulto aireada y compacta para el material molido y el producto sólido de pirólisis. Se muestra el cálculo para la densidad de bulto aireada para la primera corrida de la materia prima molida. Los cálculos de densidad de bulto de trabajo para la materia prima molida y para el producto sólido de pirólisis se realizaron a partir del cálculo no. 2. Se utilizó la ecuación 5 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 8 Balance de masa para el proceso de pirólisis

$$m_{gas} = 70.0 \text{ g} - 17.2 \text{ g} - 14.1 \text{ g} - 24.3 \text{ g} = 14.4 \text{ g gas}$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la masa de producto gaseoso del proceso de pirólisis por medio del balance de masa. Se realizó este cálculo para las corridas de pirólisis en el reactor de 100 g tanto para una proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla) como alimentación aleatoria. Asimismo, se realizó este cálculo para las corridas de pirólisis en el reactor de 7.6 kg. Se muestra el cálculo de la masa de gas para la cuarta corrida en el reactor de 100 g para la proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla). Se utilizó la ecuación 17 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 9 Rendimiento de productos de pirólisis

$$m_{alim} = 70.0 \text{ g}$$

$$m_{sólido} = 17.2 \text{ g}$$

$$\% \text{ producto sólido} = \frac{17.2 \text{ g}}{70.0 \text{ g}} * 100\% = 24.57\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar rendimiento de cada producto del proceso de pirólisis con respecto a la alimentación al reactor. Se realizó este mismo cálculo para el cálculo del rendimiento de productos en el reactor de 100 g con proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla), para el rendimiento de productos en el reactor de 100 g con proporción de alimentación aleatoria y para el rendimiento de productos en el reactor de 7.6 kg. Se muestra el cálculo correspondiente al rendimiento de producto sólido de la cuarta corrida de pirólisis en el reactor de 100 g para una alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla). Se utilizó la ecuación 18 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 10 Conversión de biomasa en el proceso de pirólisis

$$\% \text{ Conversión} = \frac{(70 - 17.2)g}{70 g} * 100\% = 75.43\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la conversión de la biomasa en producto sólido en el proceso de pirólisis. Se realizó el cálculo para los reactores de 100 g y 7.6 kg. Se muestra el cálculo correspondiente a la conversión de la cuarta corrida de pirólisis en el reactor de 100 g para una alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla). Se utilizó la ecuación 19 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 11 Rendimiento de productos de pirólisis en base seca

$$\% \text{ sol}_{bs} = \frac{17.2 g}{(70 - 24.3) g} * 100\% = 37.64\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el rendimiento de cada producto del proceso de pirólisis en base seca con respecto a la alimentación seca en el reactor. Se realizó este mismo cálculo para el cálculo del rendimiento de productos en el reactor de 100 g con proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla), para el rendimiento de productos en el reactor de 100 g con proporción de alimentación aleatoria y para el rendimiento de productos en el reactor de 7.6 kg. Se muestra el cálculo correspondiente al rendimiento de producto sólido en base seca de la cuarta corrida de pirólisis en el reactor de 100 g para una alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla). Se utilizó las ecuaciones 18 y 20 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 12 Cálculo de la masa de material sólido dentro del reactor y formación de producto gaseoso para el análisis cinético

$$\Delta m_{gas \text{ global}} = (137.3 - 0.0) g = 137.3 g \text{ gas}$$

$$\Delta m_{liquido \text{ global}} = (1310.2 - 0.0) g = 1310.2 g \text{ liquido}$$

$$k = \frac{137.3 g \text{ gas}}{1310.2 g \text{ liquido}} = 0.10479 \frac{g \text{ gas}}{g \text{ liquido}}$$

$$\Delta m_L = (17.10 - 0.0) g = 17.10 g$$

$$\Delta m_g = \left(0.10479 \frac{g \text{ gas}}{g \text{ liquido}} \right) * (17.10 g \text{ liquido}) = 1.792 g \text{ gas}$$

$$\Delta m_R = (17.10 + 1.792) g = 18.892 g$$

$$m_{g2} = 1.792 g \text{ gas} + 0.0 g \text{ gas} = 1.792 g \text{ gas}$$

$$m_{s2} = 1739.5 \text{ g} - 17.1 \text{ g} - 1.792 \text{ g} = 1720.608 \text{ g}$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la variación instantánea de masa dentro del reactor y de formación de producto gaseoso en el proceso de pirólisis para el análisis cinético. Se realizó este cálculo tanto para el análisis cinético del reactor de 100 g como para el reactor de 7.6 kg. Se muestra el cálculo realizado para el minuto 170 en los datos de análisis cinéticos para el reactor de 7.6 kg. Se utilizó las ecuaciones 21 a 28 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 13 Flujo de agua de enfriamiento en el condensador

$$q_{H_2O} = 5.32 \frac{mL}{s} * \frac{1 L}{1000 mL} * \frac{1 m^3}{1000 L} = 5.32 * 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \left(5.32 * 10^{-6} \frac{m^3}{s} \right) * \left(997.76 \frac{kg}{m^3} \right) = 0.0053 \frac{kg}{s} * \frac{3600 s}{1 h} = 0.318 \frac{kg}{h}$$

$$m_{H_2O} = \left(0.318 \frac{kg}{h} \right) * (4.25 h) = 81.21 \text{ kg } H_2O$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la cantidad de agua de enfriamiento utilizada en el proceso de pirólisis. Se realizó este cálculo para ambos reactores, tanto para el de 100 g como para el de 7.6 kg. Se muestra el cálculo de la cantidad de agua de enfriamiento utilizada para el reactor de 100 g. Se utilizó las ecuaciones 33 y 34 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 14 Balance de masa de la combustión de propano en el hogar del reactor de 7.6 kg

$$C_3H_8 (g) + 5O_2 (g) \rightarrow 3CO_2 (g) + 4H_2O (v)$$

$$2C_3H_8 (g) + 9O_2 (g) + 30.43N_2 (g) \rightarrow 4CO_2 (g) + 2CO (g) + 8H_2O (v) + 30.43N_2 (g)$$

$$m_{aire \text{ teo}} = 5 \text{ kmol}_{O_2} * 31.998 \frac{kg O_2}{\text{kmol } O_2} + \left(5 * \left(\frac{79}{21} \right) \right) \text{ kmol}_{N_2} * 28.012 \frac{kg N_2}{\text{kmol } N_2} = 686.88 \text{ kg aire}$$

$$m_{propano \text{ teo}} = 1 \text{ kmol}_{propano} * 44.0962 \frac{kg}{\text{kmol}} = 44.0962 \text{ kg}_{propano}$$

$$\frac{m_{aire \text{ teo}}}{m_{propano \text{ teo}}} = \frac{686.88 \text{ kg aire}}{44.0962 \text{ kg propano}} = 15.58 \frac{kg \text{ aire}}{kg \text{ propano}}$$

$$\% \text{ aire en exceso} = \left| \frac{\frac{m_{aire \text{ teo}}}{m_{propano \text{ teo}}} - \frac{m_{aire}}{m_{propano}}}{\frac{m_{aire \text{ teo}}}{m_{propano \text{ teo}}}} \right| * 100\% \text{ (ec. 31)}$$

$$m_{aire} = \left(\frac{m_{aire \text{ teo}}}{m_{propano \text{ teo}}} - \left(\frac{\% \text{ aire en exceso}}{100\%} \right) * \left(\frac{m_{aire \text{ teo}}}{m_{propano \text{ teo}}} \right) \right) * m_{propano}$$

$$m_{aire} = \left(15.58 \frac{kg_{aire}}{kg_{propano}} - \left(\frac{28.1\%}{100\%} \right) * \left(15.58 \frac{kg_{aire}}{kg_{propano}} \right) \right) * 3.62 kg_{propano} = 40.54 kg_{aire}$$

$$m_{O_2} = 40.54 kg_{aire} * \frac{1000 g}{1 kg} * \frac{1 mol_{aire}}{29 g_{aire}} * \frac{21 mol_{O_2}}{100 mol_{aire}} * \frac{31.998 g_{O_2}}{1 mol_{O_2}} = 9394.26 g_{O_2}$$

$$m_{N_2} = m_{aire} - m_{O_2} = (40543.26 - 9394.26) g = 3118.996 g_{N_2}$$

$$m_{propano rxn} = 0.50 * (3620.0 g_{propano}) = 1810.0 g_{propano}$$

$$m_{O_2 rxn} = 1810.0 g_{propano} * \frac{1 mol_{propano}}{44.0962 g_{propano}} * \frac{9 mol_{O_2}}{2 mol_{propano}} * \frac{31.998 g_{O_2}}{1 mol_{O_2}} = 5910.34 g_{O_2}$$

$$m_{propano salida} = m_{propano} - m_{propano rxn}$$

$$m_{O_2 salida} = m_{O_2} - m_{O_2 rxn}$$

$$m_{propano salida} = (3620.0 - 1810.0) g_{propano} = 1810.0 g_{propano}$$

$$m_{O_2 salida} = (9394.265 - 5910.30) g_{O_2} = 3483.921 g_{O_2}$$

$$m_{CO} = 1810.0 g_{propano rxn} * \frac{1 mol_{propano}}{44.0962 g_{propano}} * \frac{2 mol_{CO}}{2 mol_{propano}} * \frac{28.01 g_{CO}}{1 mol_{CO}} = 1149.716 g_{CO}$$

$$m_{CO_2} = 1810.0 g_{propano rxn} * \frac{1 mol_{propano}}{44.0962 g_{propano}} * \frac{4 mol_{CO_2}}{2 mol_{propano}} * \frac{44.009 g_{CO_2}}{1 mol_{CO_2}} = 3612.841 g_{CO_2}$$

$$m_{H_2O} = 1810.0 g_{propano rxn} * \frac{1 mol_{propano}}{44.0962} * \frac{8 mol_{H_2O}}{2 mol_{propano}} * \frac{18.0148 g_{H_2O}}{1 mol_{H_2O}} = 2957.787 g_{H_2O}$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el balance de masa correspondiente a la combustión de propano en el hogar del sistema de pirólisis de 7.6 kg. Se utilizó un porcentaje de aire en exceso de 28.1% y una eficiencia de combustión en función de una temperatura de flama promedio de 500°C de 65.80%. Se utilizó las ecuaciones 35 y 36 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 15 Energía añadida al reactor de pirólisis de 100 g

$$Q = \left(3095 \frac{J}{s} * \frac{3600 s}{1 h} \right) * 4.25 h = 47353500 J * \frac{1 kJ}{1000 J} = 47353.5 kJ \text{ de calor añadidos}$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la energía añadida al reactor de 100 g por medio de la energía de la mufla y el tiempo operativo. Se utilizó la ecuación 37 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 16 Energía añadida al reactor de pirólisis de 7.6 kg

$$m_{\text{propano}} = 1.81 \text{ kg}$$

$$P.C._{\text{propano}} = 50329 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{\text{propano}} = (1.81 \text{ kg}_{\text{propano}}) * (50329 \text{ kJ/kg}) = 91095.49 \text{ kJ}$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el calor añadido al sistema de pirólisis de 7.6 kg por el propano durante la combustión. Se utilizó la cantidad de propano que combustiona en función a la eficiencia de combustión de 50.0%. Se utilizó la ecuación 38 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 17 Balance de energía en el condensador

$$Q_{H_2O \text{ cond.}} = Q_{\text{gas+vapor}}$$

$$Q_{H_2O \text{ cond.}} = 5281.942 \text{ kg}_{H_2O} * 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * K} * (26 - 22)^\circ C = 88314.07 \text{ kJ}$$

$$\lambda_{\text{fracción pesada}} = \frac{88314.07 \text{ kJ} - 540.5 \text{ g}_{H_2O} * \frac{2.442 \text{ kJ}}{\text{g}} - 1048.16 \text{ g}_{\text{ác. acético}} * \frac{0.6511 \text{ kJ}}{\text{g}}}{262.04 \text{ g}} = 329.384 \frac{\text{kJ}}{\text{g}}$$

- Se realizó el cálculo anterior para realizar el balance de energía del condensador. Se determinó el calor removido por el agua en el condensador y posteriormente se determinó el calor latente de vaporización la fracción pesada del producto líquido de pirólisis. Se muestra el cálculo correspondiente al reactor de 7.6 kg. Se utilizó las ecuaciones 39 y 40 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 18 Determinación de la energía proporcionada por los productos de pirólisis

$$Q_{\text{sol}} = 292.0 \text{ g} * 29699 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 8672.11 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{liq}} = 1048.16 \text{ g} * 1383.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 262.04 * 22759.56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 7413.71 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{gas}} = \frac{26.087}{1000} \text{ kg}_{H_2} * 141584 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{26.087}{1000} \text{ kg}_{CO} * 10104 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{3.433}{1000} \text{ kg}_{CH_4} * 190.552 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= 4147.64 \text{ kJ}$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la energía proporcionada por cada uno de los productos de pirólisis. Se utilizó los poderes caloríficos obtenidos en el análisis fisicoquímico para el producto sólido y líquido, tanto para la fracción ligera como la fracción pesada. Se

utilizó un 80% de la masa total del producto líquido como la fracción ligera y un 20% como la fracción pesada. Se utilizó la composición teórica del producto gaseoso de pirólisis para determinar la masa de hidrógeno, monóxido de carbono y metano. Se muestra el cálculo correspondiente al balance de energía del reactor de 7.6 kg. Se utilizó las ecuaciones 41 a 43 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 19 Cálculo teórico de la energía liberada por la materia prima

$$Q_{alim} = (1 - 0.4785) \frac{2280}{1000} kg_{alim} * \frac{19145kJ}{kg} = 22763.79 kJ$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la cantidad de energía teórica en forma de calor que podría proporcionar materia prima en base seca. Se utilizó el valor promedio obtenido del porcentaje de humedad de la materia prima obtenido. Además, se utilizó un valor teórico de poder calorífico de semilla de aguacate de 19145 kJ/kg (García, del Mar, & Castro, 2020). Se utilizó la ecuación 44 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 20 Porcentaje de abundancia sin solvente de los compuestos de la fracción pesada del producto líquido de pirólisis

$$\% Abundancia = \frac{0.48\%}{9.65\%} * 100\% = 4.97\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de abundancia de los compuestos obtenidos del análisis de cromatografía de gases-masas para la fracción pesada del producto líquido de pirólisis. Se muestra el cálculo de porcentaje de abundancia sin solvente correspondiente al 2-n-heptilfurano en la primera muestra. Se realizó de igual manera el mismo cálculo para todos los demás compuestos obtenidos del análisis cromatográfico. Se utilizó la ecuación 45 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 21 Poder calorífico del producto líquido de pirólisis

$$P.C._{mezcla} = 22450 \frac{kJ}{kg}$$

$$x_{ác.benzoico} = 0.608 \frac{kg_{ác.benzoico}}{kg}$$

$$P.C.\text{-}\acute{a}c.\text{benzoico} = 26432 \frac{kJ}{kg}$$

$$x_{\text{líquido}} = 0.392 \frac{kg_{\text{líquido}}}{kg}$$

$$P.C.\text{-}\text{líquido} = \frac{22450 \frac{kJ}{kg} - \left(0.608 \frac{kg_{\acute{a}c.\text{benzoico}}}{kg}\right) * \left(26432 \frac{kJ}{kg}\right)}{0.392 \frac{kg_{\text{líquido}}}{kg}} = 16285.43 \frac{kJ}{kg}$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el poder calorífico en base húmeda del producto líquido de pirólisis. Se realizó de igual manera el mismo cálculo para la fracción ligera y la fracción pesada del producto líquido de pirólisis. Se muestra el cálculo de la primera muestra de la fracción pesada. Se utilizó la ecuación 46 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 22 Porcentaje de humedad en el producto sólido

$$W_i = 25.6092 \text{ g}$$

$$W_c = 20.5896 \text{ g}$$

$$W_f = 25.4981 \text{ g}$$

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{(25.6092 - 25.4981) \text{ g}}{(25.6092 - 20.5896) \text{ g}} \right) * 100\% = 2.21\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de humedad en el producto sólido de pirólisis. Se muestra el cálculo correspondiente al primer crisol para el análisis de humedad y se realizó de igual manera para los demás crisoles. Se utilizó la ecuación 47 de la sección de ecuaciones. Se utilizó la ecuación 47 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 23 Porcentaje de cenizas en el producto sólido

$$W_c = 20.5896 \text{ g}$$

$$W_i = 25.4981 \text{ g}$$

$$W_f = 21.0781 \text{ g}$$

$$\% \text{ Cenizas} = \left(\frac{(21.0781 - 20.5896) \text{ g}}{(25.4981 - 20.5896) \text{ g}} \right) * 100\% = 9.95\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de cenizas en el producto sólido de pirólisis. Se muestra el cálculo correspondiente al primer crisol y se realizó de igual manera para los demás crisoles. Se utilizó la ecuación 48 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 24 Porcentaje de material volátil en el producto sólido

$$\% A = \left(\frac{W_i - W_f}{W_i - W_c} \right) * 100\% \text{ (ec. 45)}$$

$$\% \text{ material volátil} = \% A - \% \text{ Humedad (ec. 46)}$$

$$W_c = 20.5895 \text{ g}$$

$$W_i = 25.5840 \text{ g}$$

$$W_f = 24.3357 \text{ g}$$

$$\% \text{ Humedad} = 2.21\%$$

$$\% A = \left(\frac{(25.5840 - 24.3357) \text{ g}}{(25.5840 - 20.5895) \text{ g}} \right) * 100\% = 24.99\%$$

$$\% \text{ material volátil} = 24.99\% - 2.21\% = 22.78\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de material volátil en el producto sólido de pirólisis. Se muestra el dato correspondiente al primer crisol y se realizó de igual manera para los demás crisoles. Se utilizó las ecuaciones 49 y 50 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 25 Porcentaje de carbono fijo en la muestra

$$\% \text{ Humedad} = 2.21\%$$

$$\% \text{ Cenizas} = 9.95\%$$

$$\% \text{ Material volátil} = 22.78\%$$

$$\% C = 100\% - 2.21\% - 9.95\% - 22.78\% = 65.05\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de carbono fijo en el producto sólido de pirólisis. Se muestra el cálculo correspondiente al primer crisol y se realizó de igual manera para los demás crisoles. Se utilizó la ecuación 51 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 26 Densidad del producto líquido

$$m_L = 186.7 \text{ g}$$

$$V = 87 \text{ mL}$$

$$\rho = \frac{186.7 \text{ g}}{87 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = 2145.98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la densidad del producto líquido de pirólisis. Se muestra el cálculo correspondiente a la segunda corrida y se realizó de igual manera para las demás corridas. Se utilizó la ecuación 52 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 27 Viscosidad cinemática del producto líquido

$$\nu = \frac{\left(\frac{10.2}{1000}\right) kg/m \cdot s}{1693.49 kg/m^3} * \frac{(1000 mm)^2}{1 m^2} = 6.023 \frac{mm^2}{s} = 6.023 cSt$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la viscosidad cinemática del producto líquido de pirólisis. Se muestra el cálculo correspondiente para la primera corrida de viscosidad y se realizó de igual manera para las demás corridas. Se utilizó la ecuación 53 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 28 Porcentaje de nitrógeno en el producto sólido

$$V_{HCl} = 3.3 mL$$

$$[HCl] = 0.125 N = 0.125 \frac{eq}{L}$$

$$m_{mx} = 0.2502 g$$

$$\% N = 3.3 mL_{HCl} * \frac{0.125 \frac{eq}{L}}{1000} * \frac{1 mol HCl}{1 eq HCl} * \frac{1 mol N}{1 mol HCl} * \frac{14.006 g N}{1 mol N} * \frac{1}{0.2502 g_{mx}} * 100\% = 2.31\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de nitrógeno en el producto sólido de pirólisis por medio del método Kjeldahl. Se muestra el cálculo correspondiente de la primera muestra y se realizó de igual manera para las demás muestras. Se utilizó la ecuación 54 de la sección de ecuaciones.

F. Análisis de error

Cálculo No. 29 Cálculo de media

$$\overline{\% \text{ producto sólido}} = \frac{21.75\% + 21.00\% + 23.43\% + 24.57\% + 23.14\%}{5} = 22.78\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el promedio de una serie de datos medidos y/o calculados. Se realizó este cálculo para determinar el valor promedio de densidades de bulto (tanto para materia prima como para el producto), tamaño de partícula, masa de partícula, humedades (de materia prima y producto), rendimiento de productos de pirólisis, poder calorífico, cenizas, material volátil, porcentaje de carbono, viscosidad y porcentaje de nitrógeno. Se muestra el cálculo correspondiente a la media del rendimiento de producto sólido de pirólisis en el reactor de 100 g en proporción de alimentación 50:50 (Cáscara:Semilla). Se utilizó la ecuación 55 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 30 Cálculo de desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{(16.71\% - 14.71\%)^2 + (14.86\% - 14.71\%)^2 + (12.57\% - 14.71\%)^2}{3 - 1}} = 3.58\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la desviación estándar de una serie de mediciones y/o cálculos. Se realizó este cálculo para determinar la desviación estándar de densidades de bulto (tanto para materia prima como para el producto), tamaño de partícula, masa de partícula, humedades (de materia prima y producto), rendimiento de productos de pirólisis, poder calorífico, cenizas, material volátil, porcentaje de carbono, viscosidad y porcentaje de nitrógeno. Se muestra el cálculo correspondiente a la desviación estándar del rendimiento de producto sólido de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria. Se utilizó la ecuación 56 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 31 Cálculo de intervalo de confianza al 95%

$$I.C._{min} = 14.71\% - (2.920) * \frac{3.58\%}{\sqrt{3}} = 8.68\%$$

$$I.C._{sup} = 14.71\% + (2.920) * \frac{3.58\%}{\sqrt{3}} = 20.75\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el intervalo de confianza al 95%. Se utilizó valores de t student para una cola con un valor de área de la cola superior de 0.05. Se realizó este cálculo para determinar el intervalo de confianza al 95% de densidades de bulto (tanto para materia prima como para el producto), tamaño de partícula, masa de partícula, humedades (de materia prima y producto), rendimiento de productos de pirólisis, poder

calorífico, cenizas, material volátil, porcentaje de carbono, viscosidad y porcentaje de nitrógeno. Se muestra el cálculo correspondiente al intervalo de confianza al 95% para el rendimiento de producto sólido de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria. Se utilizó la ecuación 57 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 32 Cálculo de prueba Q

$$Q_{crit} = 0.829$$

$$W = (30766 - 17944) \frac{kJ}{kg} = 12822 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q = \left| \frac{(17944 - 28099) \frac{kJ}{kg}}{12822 \frac{kJ}{kg}} \right| = 0.792$$

$$Q_{crit} > Q$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar si un dato dudoso de una serie de datos puede rechazarse o no en base a la variabilidad que este presenta en la serie de datos. Se muestra el cálculo de la prueba Q correspondiente al primer dato de poder calorífico del producto sólido. Se utilizó la ecuación 58 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 33 Cálculo de coeficiente de variación

$$C.V. = \frac{3.58\%}{14.71\%} * 100\% = 24.33\%$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar el coeficiente de variación de una serie de datos medidos y/o calculados. Se realizó este cálculo para determinar el coeficiente de variación de densidades de bulto (tanto para materia prima como para el producto), tamaño de partícula, masa de partícula, humedades (de materia prima y producto), rendimiento de productos de pirólisis, poder calorífico, cenizas, material volátil, porcentaje de carbono, viscosidad y porcentaje de nitrógeno. Se muestra el cálculo correspondiente para el coeficiente de variación para el rendimiento de producto sólido de pirólisis en el reactor de 100 g con alimentación aleatoria. Se utilizó la ecuación 59 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 34 Cálculo de incertidumbres por sumas y restas

$$S_{masa\ gas} = \sqrt{(0.1\ g_{materia\ prima})^2 + (0.1\ g_{sólido})^2 + (0.1\ g_{líquido})^2 + (0.1\ g_{agua})^2} = 0.20\ g\ gas$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la incertidumbre de un valor calculado por medio de sumas o restas. Se realizó este cálculo para determinar la incertidumbre de la humedad en el secado con horno deshidratador, en el análisis granulométrico, en el balance de masa de los productos de pirólisis, en los datos cinéticos de masa en función del tiempo y en los cálculos de humedad, cenizas y material volátil del producto sólido de pirólisis. Se muestra el cálculo de incertidumbre por sumas y restas correspondiente al balance de masa de los productos de pirólisis en el reactor de 100 g. Se utilizó la ecuación 60 de la sección de ecuaciones.

Cálculo No. 35 Cálculo de incertidumbres por multiplicaciones y divisiones

$$S_{\%N} = 2.31\% N * \sqrt{\left(\frac{0.0001\ g}{0.2502\ g}\right)^2 + \left(\frac{0.05\ mL}{3.3\ mL}\right)^2} = 0.03\% N$$

- Se realizó el cálculo anterior para determinar la incertidumbre de un valor calculado por medio de multiplicaciones y divisiones. Se realizó este cálculo para determinar la incertidumbre de densidades de bulto, tamaño de partícula, humedad, eficacia de molienda, rendimiento de productos de pirólisis, poder calorífico, cenizas, material volátil y porcentaje de nitrógeno. Se muestra el cálculo correspondiente a la incertidumbre por multiplicación y división de la primera del análisis de Kjeldahl y se realizó de igual manera para las demás muestras. Se utilizó la ecuación 61 de la sección de ecuaciones.

XIII. ILUSTRACIONES

Ilustración No. 1 Medición de densidades de bulto de la materia prima en recipiente plástico



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 2 Medición del diámetro de la semilla de aguacate



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 3 Medición del diámetro de la cáscara de aguacate



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 4 Preparación de la muestra de semilla de aguacate para la medición de porcentaje de humedad



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 5 Preparación de las muestras para el secado solar



(Fuente: propia)

Ilustración No. 6 Cáscaras de aguacate luego del proceso de secado solar



(Fuente: propia)

Ilustración No. 7 Trituradora de residuos orgánicos utilizada para la molienda de la materia prima



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 8 Molino de discos utilizado para la molienda de la materia prima



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 9 Cáscara de aguacate luego del proceso de molienda



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 10 Cáscara de aguacate luego del proceso de molienda



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 11 Sistema de tamizaje utilizado para el análisis granulométrico



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 12 Sistema de pirólisis del reactor de 100 g



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 13 Reactor de pirólisis de 100 g



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 14 Sistema de pirólisis del reactor de 7.6 kg



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 15 Medición de la masa de la materia prima para el reactor de pirólisis de 100g



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 16 Medición de la masa de la materia prima para el reactor de pirólisis de 7.6 kg



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

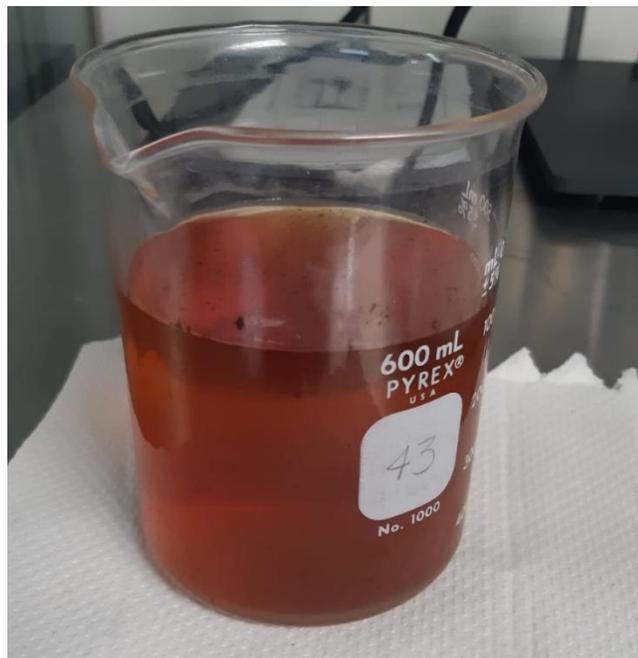
Ilustración No. 17 Producto sólido del proceso de pirólisis



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 18 Producto líquido del proceso de pirólisis



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 19 Sistema de crisoles utilizados para el análisis proximal del producto sólido



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 20 Crisol con muestra utilizado para el análisis proximal



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 21 Crisol con cenizas obtenidas durante el análisis proximal



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 22 Sistema de digestión de Kjeldahl para el análisis del producto sólido



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de investigación del departamento de Ingeniería en Ciencias de los Alimentos en la Universidad del Valle de Guatemala.

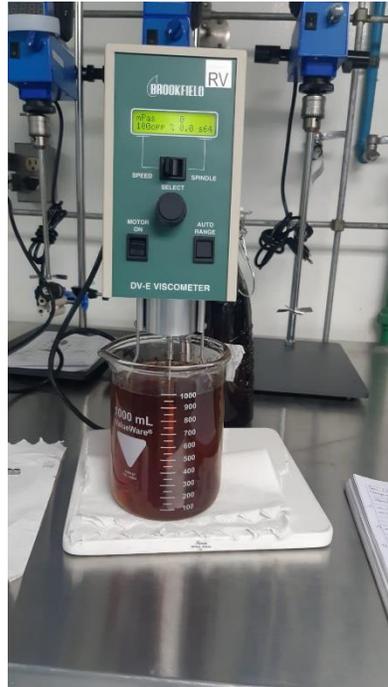
Ilustración No. 23 Sistema de destilación de Kjeldahl para el análisis del producto sólido



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de investigación del departamento de Ingeniería en Ciencias de los Alimentos en la Universidad del Valle de Guatemala.

Ilustración No. 24 Medición de viscosidad del producto líquido



(Fuente: propia)

- Ilustración obtenida en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

XIV. GLOSARIO

- **Ácido acético:** Compuesto orgánico y componente principal del vinagre.
- **Análisis proximal:** Serie y conjunto de análisis a realizar a un carbón o biocarbón para determinación del contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo.
- **Bioaceite:** Producto en fase líquida obtenido del proceso de pirólisis, utilizado esencialmente en caldera y motores de combustión interna.
- **Biocarbón o char:** Producto en fase sólida obtenido del proceso de pirólisis, compuesto esencialmente de carbono y trazas de oxígeno y nitrógeno.
- **Biomasa:** Material orgánico, que en el caso del aguacate está constituido principalmente por lignina, hemicelulosa y celulosa.
- **Bomba calorimétrica:** Equipo que permite determinar el poder calorífico de un compuesto sólido o líquido si se combustiona en un ambiente con presión de oxígeno.
- **Carbono fijo:** Residuo sólido combustible remanente que se obtiene al separar la humedad, las cenizas y el material volátil del carbón.
- **Cenizas:** Producto de la combustión de algún material, compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles, como sales minerales.
- **Cinética de reacción:** Estudio de una reacción química y el comportamiento de las especies en el tiempo bajo condiciones específicas de presión y temperatura.
- **Cromatografía:** Técnica de análisis instrumentales que permite analizar la distribución y composición de componentes en una mezcla. Utiliza una fase móvil y una fase estacionaria.
- **Densidad:** Volumen ocupado por una masa determinada, es decir, la relación de masa con volumen.
- **Densidad de bulto:** Relación de masa con un volumen dado para múltiples sólidos apilados.
- **Diagrama de flujo:** Esquema que permite representar uno o una serie de procesos en serie unidos por flujos. Se suele representar en estos diagramas los balances de masa y energía del proceso.
- **Gas de pirólisis:** Producto gaseoso obtenido del proceso de pirólisis, siendo una mezcla de gases que esencialmente son monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano.
- **Hexano:** Solvente orgánico utilizado industrialmente.
- **Humedad:** Agua contenida en la estructura de un material, se expresa como la relación de la masa de agua con respecto a la masa del sólido húmedo.

- Material volátil: Contenido gaseoso en una muestra de combustible gaseoso excluyendo vapores.
- Molienda: Proceso donde se muele un material sólido con la finalidad de reducir el tamaño de cada partícula sólida.
- Parámetros cinéticos: Constantes empleadas en modelos matemáticos, expresiones de velocidad de reacción para describirla.
- Pirólisis: Proceso de degradación térmica de un compuesto en ausencia de oxígeno y a elevadas temperaturas para realizar una ruptura en la estructura molecular y obtener productos en tres fases, siendo sólido, líquido y gas.
- Poder calorífico: Energía liberada por una sustancia, ya sea sólida, líquida o gaseosa, por una unidad de masa determinada, expresada en unidades de energía por masa.
- Viscosidad: Oposición al cambio de velocidad de un fluido. Se divide en viscosidad dinámica y viscosidad cinemática, siendo la relación de viscosidad con la densidad del fluido.