

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

*“Evaluación del potencial de gasificación térmica del rastrojo
de piña en un reactor de lecho fluidizado”*

Informe de Proyecto Final de Graduación presentado ante la Escuela de
Ingeniería Química como requisito para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Química

por

Floria Rojas Chaves

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
San José, Costa Rica
2019

Evaluación del potencial de gasificación térmica del rastrojo de piña en un reactor de lecho fluidizado

Informe de Proyecto Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería Química como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Sustentante:



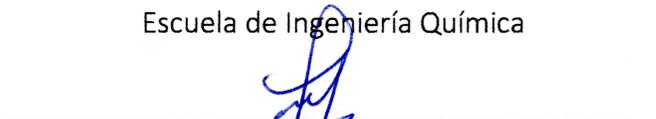
Floria Rojas Chaves

COMITÉ ASESOR



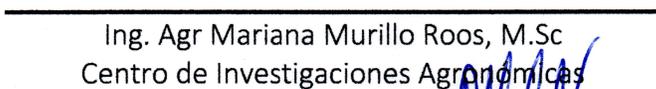
Ing. Esteban Durán Herrera, PhD
Profesor
Escuela de Ingeniería Química

Presidente



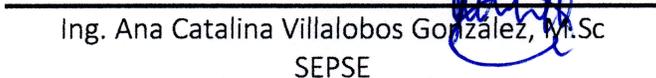
Ing. Cindy Torres Quirós, M.Sc
Profesora
Escuela de Ingeniería Química

Directora



Ing. Agr Mariana Murillo Roos, M.Sc
Centro de Investigaciones Agronómicas

Lector



Ing. Ana Catalina Villalobos González, M.Sc
SEPSE

Lector



Ing. Roberto Coto Rojas, MBA
Profesor
Escuela de Ingeniería Química

Lector

Dedicatoria

*A mis papás, Sylvia y Gustavo,
a mis hermanos, Daniel y Alejandro,
a mis ángeles en el cielo, Titu, Tita y Abuelita*

Agradecimientos

Primero, agradezco a Dios por todas las oportunidades que me ha dado en la vida.

A la profesora Cindy Torres por convertirse en más que mi profesora, mi mentora y otra mamá

Al profesor Hugo de Lasa por permitirme trabajar en su laboratorio, por todo el conocimiento que me transmitió durante mi estadía en Canadá.

A José Luis Muñoz, sin su ayuda y su paciencia este proyecto no hubiera sido posible.

A todo el personal del CREC de la Universidad de Western Ontario.

A doña Dorita, a doña Graciela y a Florencia.

Al personal del CELEQ, en especial Sylvia, José Roberto y Nela.

RESUMEN

Los procesos de gasificación son una forma de valorización de los residuos agroindustriales. Por lo que, éste podría ser una opción para la problemática presente en la actividad piñera. En la gasificación existen diferentes factores a tomar en consideración, tanto relacionados a la biomasa como características operacionales. En el presente trabajo, se estudiaron tres factores, los cuales fueron la temperatura, el agente gasificante y la relación de vapor/biomasa, para esto se realizó un diseño factorial 2^3 con una repetición; las variables fijas del experimento fueron el tiempo de reacción y la cantidad de agua presente en el sistema. Dicha experimentación se realizó en un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio, el *CREC RISER Simulator*, licenciado a la Universidad de Costa Rica, con la capacidad de controlar y adquirir los datos de reacción en tiempo real con una alta precisión.

Asimismo, se realizó la caracterización del rastrojo de piña. Con respecto a los carbohidratos estructurales se obtuvieron los siguientes porcentajes: 57.5 %, 37.6 % y 4.9 % para celulosa, hemicelulosa y lignina, respectivamente. Por lo que el rastrojo se clasifica, según Vassilev, como CHL. Por medio del análisis elemental del rastrojo se estimó su fórmula molecular como $CH_{1.8}O_{0.8}$ con un peso molecular estimado de 26.96 g/mol. En cuanto al análisis próximo, se obtuvo un rastrojo con un porcentaje de cenizas de 6.7 %, carbono fijo 9.1 % y materia volátil 84.7 %. Con respecto al análisis de cenizas, se obtuvo que los óxidos predominantes fueron el dióxido de silicio y el óxido de potasio, por lo que éstas se pueden clasificar, según Vassilev, como cenizas de acidez media.

Luego del proceso de gasificación de rastrojo de piña, se obtuvo un gas cuya composición libre de dióxido de carbono fue de 36.7 % monóxido de carbono, 34.9 % metano y 28.4 % hidrógeno.

En el escenario propuesto para Upala Agrícola S.A, en la parte del pretratamiento, se puede utilizar una picadora y un molino de compresión de rodillos como los utilizados en el procesamiento de caña de azúcar; esto debido a sus similitudes físicas. Un tándem de 6 molinos cada uno con 4 mazas, como en los ingenios azucareros, permite la reducción en aproximadamente 20 %, por tanto, en esta etapa el rastrojo de piña tendría una humedad de 60 %. Para el proceso se requiere una humedad de 18 %, por lo que se somete al proceso de secado, utilizando un secador rotatorio. El reactor propuesto es uno de lecho fluidizado burbujeante. El sistema de limpieza y recuperación del gas será para estudios posteriores. A partir de un procesamiento de 17 t/h de rastrojo, se estima que la producción de *syngas* sea de 1.6 t/h, 0.9 t/h de *biochar* y 6.5 t/h de líquido para biodigestión.

Se recomienda hacer un análisis más exhaustivo del pretratamiento a realizar, en especial el secado realizando curvas de secado; así como la vida útil del rastrojo para su eventual almacenamiento.

ÍNDICE GENERAL

<i>Dedicatoria</i>	v
<i>Agradecimientos</i>	vii
RESUMEN	ix
ÍNDICE DE CUADROS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xx
1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	25
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	25
1.2 OBJETIVO GENERAL	28
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
2 CAPÍTULO 2: BIOMASA	29
2.1 DEFINICIÓN.....	29
2.1.1 Composición de la biomasa.....	30
2.2 TIPOS DE BIOMASA.....	32
2.2.1 Caracterización de la biomasa.....	33
2.2.2 Biomasa en Costa Rica.....	34
2.3 USOS	36
2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	38
3 CAPÍTULO 3: LA PIÑA	41
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PIÑA	41
3.1.1 Requerimientos para el cultivo de piña.....	42
3.2 PROBLEMÁTICA DE LA ACTIVIDAD PIÑERA: RASTROJO DE PIÑA	44
3.2.1 Caracterización del rastrojo de piña.....	44
3.2.2 Situación actual en Costa Rica.....	45
3.3 POSIBLES TRATAMIENTOS PARA EL RASTROJO DE PIÑA	46
4 CAPÍTULO 4: GASIFICACIÓN	51
4.1 DEFINICIÓN DE GASIFICACIÓN.....	51

4.1.1	Reacciones involucradas en el proceso de gasificación	51
4.2	ETAPAS DE GASIFICACIÓN.....	53
4.2.1	Etapa de secado.....	53
4.2.2	Pirólisis.....	53
4.2.3	Combustión	54
4.2.4	Reducción	54
4.3	PRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN	54
4.3.1	Gas producido (syngas).....	54
4.3.2	Biochar.....	55
4.3.3	Alquitranes.....	56
4.4	TIPOS DE GASIFICADORES	58
4.4.1	Reactores de lecho fijo	59
4.4.2	Reactores de lecho fluidizado.....	63
4.4.3	Chemical Reactor Engineering Centre (CREC) RISER Simulator	66
4.5	PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE GASIFICACIÓN.....	68
4.5.1	Temperatura	68
4.5.2	Agente gasificante	68
4.5.3	Relación vapor/biomasa (SBR).....	68
4.5.4	Radio equivalente (ER).....	69
5	CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA.....	71
5.1	PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL RASTROJO DE PIÑA.....	71
5.2	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GASIFICACIÓN DEL RASTROJO DE PIÑA	74
5.3	EVALUACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO: UPALA AGRÍCOLA	82
6	CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS	83
6.1	PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL RASTROJO DE PIÑA.....	83
6.2	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GASIFICACIÓN DEL RASTROJO DE PIÑA	95
6.2.1	Análisis estadístico.....	95
6.2.2	Análisis de los productos de la gasificación de rastrojo de piña en el CREC RISER Simulator	100
6.2.3	Balances de masa.....	102

6.2.4	Validación de la reproducibilidad del experimento.....	109
7	CAPÍTULO 7: CASO DE ESTUDIO: UPALA AGRÍCOLA	113
7.1	ANTECEDENTES DE UPALA AGRÍCOLA	113
7.2	Caracterización del proceso productivo	115
7.3	COMPROMISO SOCIAL Y AMBIENTAL DE UPALA AGRÍCOLA	123
7.4	Posible escenario para implementar en Upala Agrícola S.A	125
8	CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135
8.1	Conclusiones.....	135
8.2	Recomendaciones	136
9	NOMENCLATURA	139
10	BIBLIOGRAFÍA.....	141
	APÉNDICES	147
A.	DATOS EXPERIMENTALES	147
B.	CÁLCULOS INTERMEDIOS	171
C.	MUESTRA DE CÁLCULO	178
	ANEXOS	185
	Anexo 1. Cromatogramas FID y TCD de las corridas experimentales.....	185
	Anexo 2. Gráficos de efectos estandarizados.....	194
	Anexo 3. Gráficos para la verificación de supuestos del análisis estadístico.....	196
	Anexo 4. Gráficos de interacción.....	200

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de diferentes tipos de biomasa (Font, 2013)	30
Cuadro 2.2. Extensión sembrada en hectáreas de diferentes cultivos en 1984 y 2014 (INEC, 2017).....	35
Cuadro 2.3. Porcentaje de las exportaciones comprendido por el sector agrícola, alimentario y maderero de los últimos seis años.....	35
Cuadro 3.1. Cantidad de nutrientes a estar presentes en los suelos para el cultivo de piña (INTAGRI, s.f).....	43
Cuadro 3.2. Composición de carbohidratos estructurales y ceniza de las diferentes partes de la planta (López-Herrera, WingChing-Jones, & Rojas-Bourrillón, 2014)	45
Cuadro 3.3. Caracterización del rastrojo de piña (Amador, s.f).....	45
Cuadro 3.4. Resultados obtenidos del estudio de biogás a partir de rastrojo de piña (Arce, Hernández, & Amador, s.f)	47
Cuadro 4.1. Características de las diferentes mezclas de gas (Jenkins, 2015)	55
Cuadro 4.2. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de reactor de lecho fijo (Rajvanshi, 2014).....	62
Cuadro 5.1. Métodos utilizados para los análisis realizados en el CICA.....	71
Cuadro 5.2. Condiciones de secado evaluadas	72
Cuadro 5.3. Métodos utilizados para cada uno de los análisis realizados en el CINA.....	72
Cuadro 5.4. Normas ASTM utilizadas para el análisis próximo	73
Cuadro 5.5. Resumen de los métodos utilizados para cada uno de los análisis realizados para la caracterización del rastrojo de piña.....	73
Cuadro 5.6. Equipo utilizado para preparación del rastrojo de piña	74
Cuadro 5.7. Factores y niveles utilizados en el diseño experimental.....	76
Cuadro 5.8. Orden de corridas del diseño experimental.....	76
Cuadro 5.9. Condiciones del GC para el caso del TCD	78
Cuadro 5.10. Condiciones del método del GC para el FID	78
Cuadro 5.11. Condiciones utilizadas para el análisis de área superficial	81
Cuadro 5.12. Equipos utilizados en el CREC (UWO).....	81
Cuadro 5.13. Variables involucradas en el proceso para la evaluación del potencial de gasificación	81

Cuadro 6.1. Composición de carbohidratos estructurales del rastrojo de piña	86
Cuadro 6.2. Análisis último para el rastrojo de piña.....	88
Cuadro 6.3. Composición promedio y la desviación estándar de las cenizas de rastrojo de piña obtenidas por medio de análisis XRF.....	89
Cuadro 6.4. Análisis próximo del rastrojo de piña.....	91
Cuadro 6.5. Análisis de aguas del líquido de prensado	92
Cuadro 6.6. Límites máximos permisibles para vertido de aguas en alcantarillados sanitarios o en un cuerpo receptor (Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N33601, 2010)	92
Cuadro 6.7. Cantidad promedio y su correspondiente desviación estándar obtenida de cada especie en cada una de las corridas experimentales	95
Cuadro 6.8. Efectos e interacciones significativas para cada caso estudiado	96
Cuadro 6.9. Nivel de cada factor que debe ser utilizado.....	97
Cuadro 6.10. Modelo obtenido para cada una de las variables según efectos e interacciones significativos	98
Cuadro 6.11. Relación hidrógeno/monóxido de carbono promedio.....	108
Cuadro 6.12. Composición del syngas libre de CO ₂ para diferentes biomásas/ (%).....	109
Cuadro 6.13. Cantidad promedio producida de cada uno de los gases de interés para las corridas de validación.....	109
Cuadro 6.14. Coeficiente de variación para las variables de respuesta estudiadas	110
Cuadro 6.15. Valores de decisión para la prueba de hipótesis	111
Cuadro 6.16. Valores de área superficial para el biochar obtenido bajo condiciones de helio (vapor de agua como agente gasificante), S/B 0,2 y 550 °C.....	111
Cuadro 7.1. Clasificación de los tipos de secador según el tipo de alimentación (Hall, 2006)	129
Cuadro 7.2. Cantidades producidas de gas y de biochar.....	131
Cuadro 7.3. Productos del sistema de gasificación de rastrojo de piña	134
Cuadro A.1. Datos de masa del DOE1	147
Cuadro A.2. Datos de masa del DOE2	147
Cuadro A.3. Datos de masa del DOE3	147
Cuadro A.4. Datos de masa DOE8	147
Cuadro A.5. Datos de masa del DOE9	148

Cuadro A.6. Datos de masa del DOE11	148
Cuadro A.7. Datos de masa del DOE12	148
Cuadro A.8. Datos de masa del DOE16	149
Cuadro A.9. Datos de masa del DOE4	149
Cuadro A.10. Datos de masa del DOE5	149
Cuadro A.11. Datos de masa del DOE6	149
Cuadro A.12. Datos de masa del DOE7	150
Cuadro A.13. Datos de masa del DOE10	150
Cuadro A.14. Datos de masa del DOE13	150
Cuadro A.15. Datos de masa del DOE14	150
Cuadro A.16. Datos de masa del DOE15	151
Cuadro A.17. Datos de masa de Val1	151
Cuadro A.18. Datos de masa de Val2	151
Cuadro A.19. Datos de masa de Val3	151
Cuadro A.20. Datos de temperatura de DOE1	152
Cuadro A.21. Datos de temperatura del DOE2	152
Cuadro A.22. Datos de temperatura del DOE3	153
Cuadro A.23. Datos de temperatura de DOE8	153
Cuadro A.24. Datos de temperatura del DOE9	154
Cuadro A.25. Datos de temperatura del DOE11	154
Cuadro A.26. Datos de temperatura del DOE12	155
Cuadro A.27. Datos de temperatura del DOE16	155
Cuadro A.28. Datos de temperatura del DOE4	156
Cuadro A.29. Datos de temperatura del DOE5	156
Cuadro A.30. Datos de temperatura del DOE6	157
Cuadro A.31. Datos de temperatura del DOE7	157
Cuadro A.32. Datos de temperatura del DOE10	158
Cuadro A.33. Datos de temperatura del DOE13	158
Cuadro A.34. Datos de temperatura del DOE14	159
Cuadro A.35. Datos de temperatura del DOE15	159

Cuadro A.36. Datos de temperatura de Val1	160
Cuadro A.37. Datos de temperatura de Val2	160
Cuadro A.38. Datos de temperatura de Val3	161
Cuadro A.39. Datos de presión del DOE1.....	161
Cuadro A.40. Datos de presión del DOE2.....	161
Cuadro A.41. Datos de presión del DOE3.....	161
Cuadro A.42. Datos de presión del DOE8.....	162
Cuadro A.43. Datos de presión del DOE9.....	162
Cuadro A.44. Datos de presión del DOE11.....	162
Cuadro A.45. Datos de presión del DOE12.....	162
Cuadro A.46. Datos de presión del DOE16.....	162
Cuadro A.47. Datos de presión del DOE4.....	162
Cuadro A.48. Datos de presión del DOE5.....	163
Cuadro A.49. Datos de presión del DOE6.....	163
Cuadro A.50. Datos de presión del DOE7.....	163
Cuadro A.51. Datos de presión del DOE10.....	163
Cuadro A.52. Datos de presión del DOE13.....	163
Cuadro A.53. Datos de presión del DOE14.....	163
Cuadro A.54. Datos de presión del DOE15.....	163
Cuadro A.55. Datos de presión de Val1.....	164
Cuadro A.56. Datos de presión de Val2.....	164
Cuadro A.57. Datos de presión de Val3.....	164
Cuadro A.58. Resultados del TCD para DOE1.....	164
Cuadro A.59. Resultados del TCD para DOE2.....	164
Cuadro A.60. Resultados del TCD para DOE3.....	165
Cuadro A.61. Resultados del TCD para DOE8.....	165
Cuadro A.62. Resultados del TCD para DOE9.....	165
Cuadro A.63. Resultados del TCD para DOE11.....	166
Cuadro A.64. Resultados del TCD para DOE12.....	166
Cuadro A.65. Resultados del TCD para DOE16.....	166

Cuadro A.66. Resultados del TCD para DOE4	167
Cuadro A.67. Resultados del TCD para DOE5	167
Cuadro A.68. Resultados del TCD para DOE6	167
Cuadro A.69. Resultados del TCD para DOE7	168
Cuadro A.70. Resultados del TCD para DOE10	168
Cuadro A.71. Resultados del TCD para DOE13	168
Cuadro A.72. Resultados del TCD para DOE14	169
Cuadro A.73. Resultados del TCD para DOE15	169
Cuadro A.74. Resultados del TCD para Val1	169
Cuadro A.75. Resultados del TCD para Val2	170
Cuadro A.76. Resultados del TCD para Val3	170
Cuadro A.77. Medición de masa para la determinación de humedad del rastrojo de piña	170
Cuadro A.78. Medición de masa para la determinación de la materia volátil del rastrojo de piña	171
Cuadro A.79. Resultados obtenidos del análisis realizado en el CINA para determinación de carbohidratos estructurales.....	171
Cuadro A.80. Cantidad producida de cada gas en cada una de las corridas de validación .	171
Cuadro B.81. Cantidad de hidrógeno producida en cada una de las corridas del diseño experimental.....	171
Cuadro B.82. Cálculo de los efectos e interacciones para la cantidad de hidrógeno	172
Cuadro B.83. Cantidad de metano producida en cada una de las corridas del diseño experimental.....	172
Cuadro B.84. Cálculo de los efectos e interacciones para la cantidad de metano	172
Cuadro B.85. Cálculo de los efectos e interacciones para la cantidad de monóxido de carbono	173
Cuadro B.86. Cantidad de dióxido de carbono producida en cada una de las corridas del diseño experimental	173
Cuadro B.87. Cálculo de los efectos e interacciones para la cantidad de dióxido de carbono	174
Cuadro B.88. Parámetros estadísticos	174
Cuadro B.89. Intervalo de no significancia.....	174
Cuadro B.90. Datos obtenidos a partir de la ecuación de estado.....	174

Cuadro B.91. Datos obtenidos a partir de la ecuación de estado	176
Cuadro B.92. Datos obtenidos a partir de la ecuación de estado	176
Cuadro B.93. Datos obtenidos a partir de la ecuación de estado	177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estructura de la lignina (Lu, et al., 2017).....	30
Figura 2.2. Tres subunidades de celulosa (Yurkanis, 2008)	31
Figura 2.3. Estructura de la hemicelulosa (Kuhn, A., 2018)	32
Figura 2.4. Exportaciones agrícolas, alimentarias y maderera de los últimos 6 años (PROCOMER, s.f.).....	36
Figura 2.5. Rutas para obtención de energía a partir de biomasa (Vakkilainen, 2017)	37
Figura 2.6. Distribución del uso de biomasa para el 2009, según IEA (Vakkilainen, 2017) ...	38
Figura 3.1. Anatomía de la piña (Garita, 2014)	42
Figura 4.1. Tipos de gasificadores (Sansaniwal, Pal, Rosen, & Tyagi, 2017).....	58
Figura 4.2. Rango de aplicación dependiendo del tipo de reactor (Basu, 2010)	59
Figura 4.3. Esquema de un gasificador de lecho ascendente (deLasa, Salaices, Mazumder, & Lucky, 2011).....	60
Figura 4.4. Esquema de un gasificador descendente (deLasa, Salaices, Mazumder, & Lucky, 2011).....	61
Figura 4.5. Esquema de un gasificador crossdraft (Kuhn, A, 2018)	62
Figura 4.6. Diagrama de un gasificador de lecho burbujeante (Luque, Lin, Wilson, & Clark, 2016).....	65
Figura 4.7. Diagrama de un gasificador de cama circulante (Luque, Lin, Wilson, & Clark, 2016)	65
Figura 4.8. Diagrama del CREC RISER Simulator (Mazumder & deLasa, 2018)	67
Figura 4.9. Acercamiento del reactor del CREC RISER Simulator (Kuhn, 2018)	67
Figura 5.1. Colocación del rastrojo de piña en el reactor	77
Figura 5.2. Esquema de las tuberías del CREC RISER Simulator para muestreo en línea en el GC (Kuhn, Torres, Mazumder, & de Lasa, 2018).....	79
Figura 5.3. Muestras de biochar para TOC en botes de cerámica	80
Figura 6.1. a) Rastrojo cortado y congelado b) Rastrojo licuado	84
Figura 6.2. a) Rastrojo prensado b) Líquido obtenido del prensado.....	85
Figura 6.3. a) Rastrojo de piña secado a 103 °C b) Rastrojo de piña secado a 70 °C.....	86
Figura 6.4. Diagrama ternario de carbohidratos estructurales de algunas biomásas.....	88

Figura 6.5. Cenizas obtenidas del rastrojo de piña.....	89
Figura 6.6. Diagrama ternario del análisis de cenizas de rastrojo de piña	90
Figura 6.7. Diagrama ternario del análisis próximo de algunas biomásas	91
Figura 6.8. a) Fase menos densa obtenida de la molienda de rastrojo de piña b) Fase densa de rastrojo de piña obtenida de la molienda c) Rastrojo tamizado entre 106 μm y 53 μm ..	94
Figura 6.9. Gráfico de efectos estandarizados para metano.....	96
Figura 6.10. Análisis de interacción AB para el monóxido de carbono	97
Figura 6.11. Análisis de la interacción BC para el monóxido de carbono	97
Figura 6.12. Verificación de supuestos para el caso del monóxido de carbono A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad.....	99
Figura 6.13. Cromatograma TCD para una corrida con condiciones de 600 °C, una relación de vapor/biomasa de 0,2 y agente gasificante vapor de agua	101
Figura 6.14. Cromatograma <i>FID</i> para una corrida con condiciones de 600 °C, una relación de vapor/biomasa de 0,2 y vapor de agua como agente gasificante	102
Figura 6.15. Entradas y salidas para el balance de carbono.....	103
Figura 6.16. Perfil de presión de una corrida a 550 °C, con H ₂ O como agente gasificante y S/B de 0,2	104
Figura 6.17. Balances de carbono para cada una de las corridas del diseño experimental y los límites máximo y mínimo permisible	105
Figura 6.18. Composición del syngas con una relación de vapor/biomasa de 0,2 Nota: *se refiere a los experimentos realizados con CO ₂ como agente gasificante.....	107
Figura 6.19. Composición del syngas con una relación de vapor/biomasa de 0,4 Nota: *se refiere a los experimentos realizados con CO ₂ como agente gasificante.....	107
Figura 6.20. Cantidad promedio producida de cada uno de los gases de interés con su respectiva desviación estándar	110
Figura 7.1. Ciclo de trabajo relacionada a la actividad piñera	116
Figura 7.2. Disposición de los bloques para siembra (Elaboración propia)	117
Figura 7.3. Maquinaria utilizada para la labor de encamado (Fotografía propia)	117
Figura 7.4. Terreno preparado luego de subsolado, rastra y encamado (Fotografía propia)	118
Figura 7.5. Canales para el drenaje del terreno (Fotografía propia)	119
Figura 7.6. Gaveta para recolección de sedimento (Fotografía propia).....	119
Figura 7.7. A) Hijo guía B) Hijo basal (Fotografía propia).....	120

Figura 7.8. Herramienta utilizada para la siembra (Fotografía propia)	121
Figura 7.9. Terreno en proceso de siembra (Fotografía propia)	121
Figura 7.10. Sistema de cosecha de la piña (Fotografía propia)	122
Figura 7.11. Zonas de producción y de conservación de Upala Agrícola	124
Figura 7.12. Etapas para un sistema de gasificación.....	125
Figura 7.13. Diagrama de una picadora para caña de azúcar (Hugot, 1986)	126
Figura 7.14. Diagrama de una desfibradora para caña de azúcar (Rein, 2007)	127
Figura 7.15. Molino tradicional de 4 mazas para caña de azúcar (Febles, 2016)	128
Figura 7.16. Configuraciones de gasificadores de lecho fluidizado A) Burbujeante B) Circulante (Resende, 2014).....	130
Figura 7.17. Esquema de aprovechamiento de cada producto generado durante el proceso de gasificación (Elaboración propia)	131
Figura 7.18. Exportaciones de Upala Agrícola de 2018.....	132
Figura 7.19. Cantidad de hectáreas cosechadas de 2018	132
Figura 7.20. Cantidad de rastrojo disponible durante 2018	133
Figura 7.21. Diagrama de flujo de proceso para producción de syngas a partir de rastrojo de piña	134
Figura A. 1. Cromatogramas para DOE1 A) FID B) TCD.....	185
Figura A. 2. Cromatogramas para DOE2 A) FID B) TCD	185
Figura A. 3. Cromatogramas para DOE3 A) FID B) TCD	186
Figura A. 4. Cromatogramas para DOE8 A) FID B) TCD	186
Figura A. 5. Cromatogramas para DOE9 A) FID B) TCD	187
Figura A. 6. Cromatogramas para DOE11 A) FID B) TCD	187
Figura A. 7. Cromatogramas para DOE12 A) FID B) TCD	188
Figura A. 8. Cromatogramas para DOE16 A) FID B) TCD	188
Figura A. 9. Cromatogramas para DOE4 A) FID B) TCD	189
Figura A. 10. Cromatogramas para DOE5 A) FID B) TCD	189
Figura A. 11. Cromatogramas para DOE6 A) FID B) TCD	190
Figura A. 12. Cromatogramas para DOE7 A) FID B) TCD	190
Figura A. 13. Cromatogramas para DOE10 A) FID B) TCD	191
Figura A. 14. Cromatogramas para DOE13 A) FID B) TCD	191

Figura A. 15. Cromatogramas para DOE14 A) FID B) TCD	192
Figura A.16. Cromatogramas para DOE15 A) FID B) TCD	192
Figura A. 17. Cromatogramas para Val1 A) FID B) TCD.....	193
Figura A. 18. Cromatogramas para Val2 A) FID B) TCD.....	193
Figura A. 19. Cromatogramas para Val3 A) FID B) TCD.....	194
Figura B. 1. Gráfico de efectos estandarizados para el dióxido de carbono	194
Figura B. 2. Gráfico de efectos estandarizados para el hidrógeno	195
Figura B. 3. Gráfico de efectos estandarizados para el metano	195
Figura C.1. Verificación de supuestos para el caso del hidrógeno A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad	197
Figura C.2. Verificación de supuestos para el caso del dióxido de carbono A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad.....	198
Figura C.3. Verificación de los supuestos para el caso de metano A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad.....	199
Figura C.4. Verificación de supuestos para el caso del biochar A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad.....	200
Figura D. 1. Análisis de la interacción AC para el hidrógeno.....	200
Figura D. 2. Análisis de la interacción AB para el metano	201

1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

En Costa Rica, el cultivo de la piña se remonta a épocas precolombinas. Sin embargo, fue en la década de los 80 donde inició su expansión en algunas zonas del Caribe y Pacífico Sur y para el año 2007, se convirtió en el primer productor de piña a nivel mundial. Aproximadamente un 75 % de la piña que se cultiva es para exportación y el restante 25 % es el que no cumple los estándares por lo que se queda para consumo nacional. Los principales mercados para este producto son en Europa, a países como: Holanda, Bélgica, Alemania, Italia, Reino Unido y España, así como Estados Unidos (Maglianesi, 2013). Para el 2013, se dio, según el informe de la ONU, una producción de piña, en Costa Rica, de 2 685 131 t (Chaves, s.f).

Dichas exportaciones han aumentado a través de los años; para el 2001, éstas correspondieron a 142 millones USD y para el 2007 a 485 mil USD; de este modo, la piña, para 2007, se convirtió el segundo producto de exportación, superando al café (253 mil USD) y por debajo del banano (660 mil USD) (Maglianesi, 2013). Para el 2015, la piña se colocó, también, como el segundo producto de exportación, el cual generó 804.8 mil USD (Chaves, s.f). Para el mes de julio de 2017, las exportaciones de la piña han generado 549.5 mil USD. Por tanto, la actividad piñera abarca el 33 % de las exportaciones del sector agrícola (PROCOMER, s.f.).

Asimismo, se puede observar cómo esta actividad se ha extendido en Costa Rica, donde para el 2000 existían alrededor de 47 empresas dedicadas a este cultivo y para el 2013, entre nacionales y transnacionales, alrededor de 144 empresas (Maglianesi, 2013). Para el 2016, había 127 empresas, que generaron más de 12 000 USD cada una, dedicadas a la actividad piñera (Alpízar, et al., 2017). Ésta se desarrolla en 54 de los 81 cantones del país: en la Zona Norte, el Caribe, Pacífico Central y Sur. El cantón de San Carlos contaba, para el 2015, 10 449 hectáreas sembradas, siendo el cantón con la mayor extensión dedicada a la misma,

mientras que Coto Brus es el que tiene menos hectáreas dedicadas a ésta, con 12.1 hectáreas (Vigésimosgundo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, 2016).

En cuanto al empleo, la actividad piñera genera alrededor de 30 mil empleados directos y 120 mil indirectos. En 1995, el empleo directo con respecto a esta actividad era de 4 200 y para el 2015, de 31 500. Asimismo, esta actividad ha logrado ser un impulsor en el desarrollo económico y social en zonas como la Huétar Norte, Atlántica, Pacífico Central y Sur; para el 2015, ésta representó 160 mil millones de colones por concepto de pago de salarios. De la misma forma, se puede ver que, en cantones como San Carlos, Upala, Los Chiles y Guatuso, se ha dado un incremento en el Índice de Desarrollo Humano, por ejemplo, en San Carlos pasó de 0.675, en 2004, a 0.749 en 2014 (Chaves, s.f).

Como se puede observar, la actividad piñera ha sido un factor muy influyente en el desarrollo del país. Sin embargo, alrededor de esta actividad se tienen ciertas preocupaciones en el campo ambiental, como lo es la contaminación de cuerpos de agua y el manejo inadecuado de los desechos de la piña, los cuales generan la propagación de la mosca de establo (Maglianesi, 2013).

Dichos desechos, siendo conjunto de tallos, hojas y raíces que quedan en el terreno al eliminar el cultivo, son lo que se conoce como rastrojo. Se ha estimado que, por cada hectárea cultivada de piña, se generan aproximadamente 250 t de rastrojo (González L. , 2012). En el territorio nacional, aproximadamente hay 38 000 hectáreas dedicadas al cultivo de piña (CANAPEP, 2016). Debido al gran volumen que se tiene de este desecho y sus implicaciones ambientales es que se debe realizar un manejo adecuado del mismo. Para lo cual, el Ministerio de Agricultura y Ganadería ha establecido una serie de técnicas para la eliminación del rastrojo.

Existen dos técnicas para la eliminación del rastrojo: la convencional que consiste en la aplicación de un herbicida y luego se da una reincorporación del rastrojo al suelo. Sin embargo, el uso de este producto puede llevar a implicaciones ambientales mayores. La otra forma de eliminar el rastrojo es la incorporación del rastrojo al suelo utilizando maquinaria

agrícola, lo que ayuda a la fertilidad del suelo y la capacidad de retención de humedad (González L. , 2012).

Sin embargo, se podrían implementar otras tecnologías para eliminar el rastrojo obteniendo un beneficio del mismo; es decir, aprovechar desechos de un proceso. El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) desarrolló un sistema a escala de laboratorio para el estudio de biogás a partir de rastrojo de piña, obtuvieron por tonelada de rastrojo 25.7 m³ de biogás con una concentración de metano de 52 %. A pesar de que, hay una diferencia significativa en el potencial de generación de biogás al compararlo con otros sustratos. Sin embargo, lo obtenido no es nada despreciable (Arce, Hernández, & Amador, s.f)

La biomasa puede ser tratada por medios bioquímicos o termoquímicos, en el caso de la digestión, lo cual fue lo estudiado por el ICE, es un tratamiento bioquímico y en la rama de los termoquímicos, se encuentra la gasificación.

Esta técnica consiste en un proceso químico que convierte material carbonoso, como la biomasa, en combustibles gaseosos. La biomasa está formada por especies vivas como plantas o animales. Se dice que es una fuente renovable, dado que, a diferencia de los combustibles fósiles, ésta se puede reproducir. A partir de la biomasa, como bagazo, soya, madera, entre otros, se puede producir etanol, biodiesel y gas. Sin embargo, solamente alrededor del 5 % de la biomasa puede ser utilizada para obtener energía, lo cual, es de igual manera, suficiente para el abastecimiento de un 26 % del consumo de energía global, esto para el año 2007 (Basu, 2010).

En cuanto a la gasificación, esta se puede realizar en reactores de lecho móvil o de lecho fluidizado, entre los primeros se encuentran los de lecho descendente y los de lecho ascendentes. Los de uso más común, en países como Estados Unidos y Canadá, son los de lecho descendente, seguidos por los de lecho fluidizado, y por último los ascendentes (Basu, 2010).

Por tanto, el propósito de este proyecto es evaluar el potencial de gasificación térmica del rastrojo de piña prensado en un reactor de lecho fluidizado, con la correspondiente

caracterización del mismo. De modo que se pueda evaluar la factibilidad de dicha tecnología para la reducción del impacto del rastrojo de piña obteniendo un beneficio del mismo. Asimismo, se debe estudiar la preparación de la materia prima para que sea apta para el proceso termoquímico, debido que no se cuenta con evidencia experimental en cuanto a las condiciones o tratamientos a aplicar.

Del mismo modo, el proceso de gasificación requiere conocimiento y aplicación en temáticas de análisis de procesos, fenómenos de transferencia, tanto de masa como de calor involucrados en el proceso, así como la cinética correspondiente a las reacciones que se dan durante la gasificación y la termodinámica de las mismas, e incluso el diseño de reactores.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial de gasificación térmica del rastrojo de piña en un reactor de lecho fluidizado.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Relacionar el producto obtenido (composición del *syngas*, cantidad de especies de gas, cantidad de biochar producido) con las variables de estudio (temperatura, relación de vapor/biomasa y agente gasificante).
- Validar la reproducibilidad de las mejores condiciones.
- Evaluar el potencial de gasificación térmica del rastrojo de piña.

2 CAPÍTULO 2: BIOMASA

En este capítulo se define el concepto de biomasa, iniciando por su descripción. Asimismo, se abordarán temas como la clasificación de la misma y su respectiva caracterización, por medio de análisis último y próximo, así como la determinación de sus carbohidratos estructurales. Seguidamente, se hace un abordaje de la biomasa en Costa Rica y un estudio de los principales usos que puede tener la misma.

2.1 DEFINICIÓN

La biomasa se refiere a cualquier material orgánico derivado de plantas o animales (Basu, 2010). Esta definición de biomasa es muy amplia y encierra diversos materiales, como madera, residuos de madera, residuos agrícolas, desechos de procesamiento de alimentos, plantas acuáticas, desechos de animales, entre muchos otros; incluso se podría llevar a considerar a los combustibles fósiles como biomasa, debido a que son producto de plantas que fosilizaron hace millones de años, sin embargo, no entran dentro de la categoría de biomasa, porque éstos aumentan la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, mientras que el CO₂ que se libera a la atmósfera por la combustión de biomasa es removido por el proceso de fotosíntesis (Gupta & Demirbas, 2010). Debido a lo anterior la biomasa es considerada carbono neutral.

Asimismo, la biomasa incluye gases y líquidos que se pueden recuperar de la descomposición de materiales orgánicos biodegradables y no fosilizados. Además, es considerada una fuente de energía sostenible y renovable debido a que está en constante formación debido a la interacción del dióxido de carbono, el agua, el aire, la tierra y la luz solar con plantas y animales (Basu, 2010).

2.1.1 Composición de la biomasa

Los principales componentes de la biomasa son la celulosa, hemicelulosa, extractivos, lípidos, azúcares simples, almidón, agua y cenizas (Gandía, Arzamendi, & Diéguez, 2013). En el Cuadro 2.1 se muestra la composición de algunas biomásas.

Cuadro 2.1. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina de diferentes tipos de biomasa (Font, 2013)

Tipo de biomasa	Composición (%)		
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Cascarilla de arroz	30	25	12
Bagazo	38	39	20
Cascarilla de trigo	40	28	17
Madera de pino	42.1	17.7	25
Cáscara de semilla de girasol	26.7	18.4	27

Lignina

La lignina es un polímero fenólico altamente ramificado, amorfo e irregular. En las plantas, su función es la de dar soporte, transporte de agua y nutrientes y protección para prevenir ataques químicos y biológicos. A pesar de ser un compuesto complejo, dentro de su estructura se identifican tres monómeros principales, los cuales son: *p*-hidroxifenil, guaicol y siringil.

El contenido de lignina varía dependiendo del tipo de biomasa, por ejemplo, para las maderas suaves está en el rango de 24 % a 33 %, en maderas duras de 19 % -28 % y en zacates de 15 % a 25 %. En la Figura 2.1 se muestra la estructura de la lignina.

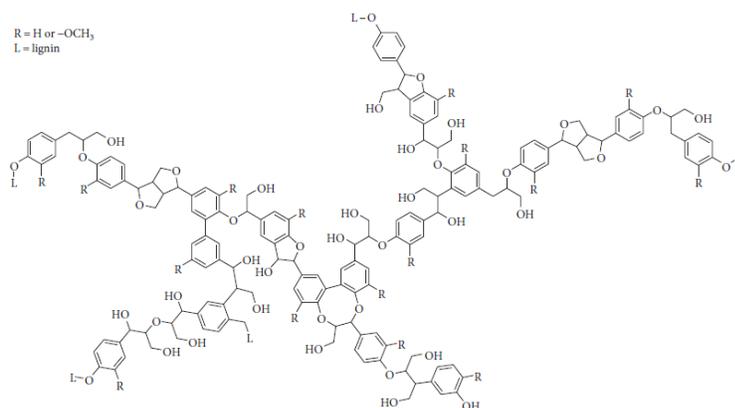


Figura 2.1. Estructura de la lignina (Lu, et al., 2017)

Celulosa

La celulosa es el componente principal de la estructura de las plantas. Éste es uno de los polisacáridos más comunes. Está formada por cadenas no ramificadas de unidades de D-glucosa que están unidas por enlaces de tipo β -1,4', éstos favorecen la formación de puentes de hidrógeno intramoleculares, por lo que las unidades de glucosa se ordenan de forma lineal, lo que hace que sea una molécula insoluble en agua (Yurkanis, 2008). En la Figura 2.2, se puede observar la estructura de la celulosa y los enlaces que unen cada una de las unidades que la conforman.

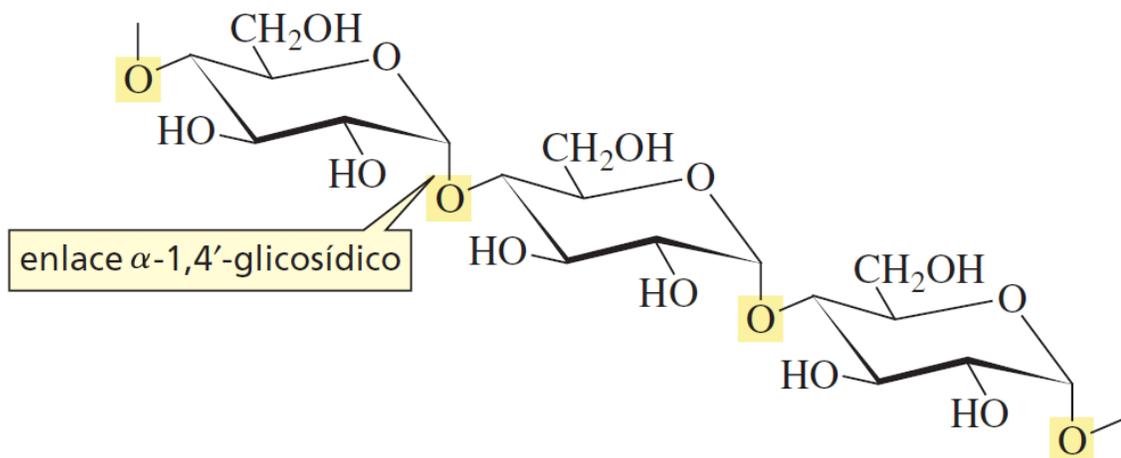


Figura 2.2. Tres subunidades de celulosa (Yurkanis, 2008)

Hemicelulosa

La hemicelulosa es un polímero formado por pentosas y hexosas, la cual se puede encontrar en la pared celular de las plantas. Además, es insoluble en agua, pero soluble en soluciones alcalinas (Huffman, 2003). Dentro de esas pentosas y hexosas que conforman esta estructura incluyen la manosa, xilosa, glucosa y galactosa en el esqueleto, mientras que en las ramificaciones se encuentra arabinosa, galactosa, glucosa y ácido glucurónico (Hamaker, Tuncil, & Shen, 2019). En la Figura 2.3, se muestra la estructura de la hemicelulosa.

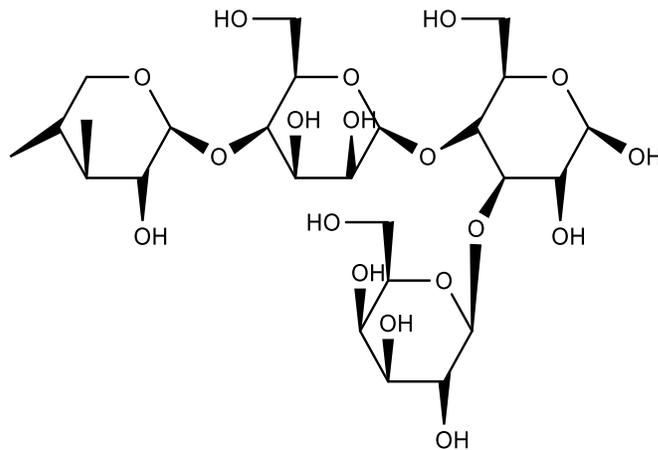


Figura 2.3. Estructura de la hemicelulosa (Kuhn, A., 2018)

2.2 TIPOS DE BIOMASA

La biomasa se puede dividir en cuatro categorías generales, con respecto a su origen (Gupta & Demirbas, 2010):

- Cultivos energéticos: comprenden las especies que son cultivadas anual y perennemente para producir formas de energía, ya sea por medio de sólido, líquido o gas.
- Residuos y desechos agrícolas
- Residuos y desechos forestales
- Desechos industriales y municipales

También se puede clasificar en tres categorías dependiendo de su composición (Gandía, Arzamendi, & Diéguez, 2013):

- Biomasa “triglicérida”: comprende la biomasa, ya sea de origen animal o vegetal, con ácidos grasos y glicerol. Dentro de esta categoría están los diferentes aceites vegetales y los desechos de productos oleosos. Este tipo podría ser prometedor para la producción de hidrógeno debido a la baja relación O/C, sin embargo, actualmente, los aceites se están utilizando principalmente para producción de biodiésel.

- Carbohidratos: esta biomasa es utilizada en forma de glucosa o xilosa, sacarosa y almidón. Se caracterizan por hidrolizarse relativamente fácil y luego fermentación.
- Biomasa lignocelulósica: éstos son materiales fibrosos que constituyen las paredes celulares. Están compuestos básicamente por tres polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina. Este tipo de biomasa tiene algunos beneficios, como lo es un ciclo de vida corto en emisiones de carbono, no se asocian a cambios en el uso del suelo.

Por otro lado, se puede hablar de biomasa de primera y segunda generación. Incluso se habla de biomasa de tercera generación, lo cual se refiere al uso, principalmente, de algas.

Actualmente el tipo de biomasa más utilizada para la producción de energía es la madera y los residuos forestales, luego los desechos sólidos municipales, seguidamente los residuos agrícolas y los gases provenientes de rellenos sanitarios (Gandía, Arzamendi, & Diéguez, 2013).

2.2.1 Caracterización de la biomasa

Debido a la gran variedad de biomasa existente, se debe conocer sus propiedades para determinar las potenciales aplicaciones, procesos a los que se puede someter y las posibles dificultades que se pueden presentar.

Análisis próximo

En este se estudian los productos que van evolucionando con un calentamiento controlado: humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas, respectivamente (Crocker, 2010). Para lo cual existen diferentes normas ASTM, como lo son la: E871-82 para humedad inicial, E1755 para cenizas y E872-82 para materia volátil. El contenido de carbono fijo corresponde a la diferencia de la totalidad menos los porcentajes de humedad, ceniza y materia volátil (Gómez C. , 2018).

Análisis último

Se basa en los elementos que conforman la biomasa, típicamente carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cloro. Este análisis también cuantifica la humedad y las cenizas

y en conjunto con el próximo, son de suma importancia en procesos termoquímicos (Crocker, 2010). Para la determinación de cada uno de estos se tienen normas estandarizadas ASTM, las cuales se mencionan a continuación (Basu, 2010):

- Carbono e hidrógeno: E-777
- Nitrógeno: E-778
- Azufre: E-775
- Humedad: E-871
- Ceniza: D-1102

Poder calórico

Este análisis se utiliza para categorizar la biomasa dependiendo de la energía contenida entre los enlaces químicos que la comprenden. Se puede expresar en términos del superior e inferior (HHV y LHV, por sus siglas en inglés, respectivamente). HHV es la cantidad de calor que desprende durante la combustión incluyendo el calor latente de vaporización del agua presente en la muestra, mientras que, el LHV no incluye ese calor de vaporización del agua. Estos valores se utilizan para describir un combustible que vaya a ser utilizado en procesos de combustión o gasificación (Crocker, 2010).

2.2.2 Biomasa en Costa Rica

La biomasa es muy vasta y Costa Rica es un país sumamente agrícola, como se puede observar en la Figura 2.4, para los últimos seis años, las exportaciones del sector agrícola y alimentario, así como las referentes a la industria maderera, han sido bastante constantes. Por consiguiente, Costa Rica tiene una amplia variedad de biomasa para su potencial aprovechamiento en sistemas como lo es la gasificación. Incluso, si se observa para el caso específico de la piña, las exportaciones de solamente este fruto son superiores a las de la industria maderera. Seguidamente, en el Cuadro 2.3 se presenta el porcentaje correspondiente a cada una de esas actividades en las exportaciones nacionales totales, por medio de lo cual se observa la incidencia de estas actividades a la economía nacional. La exportación de piña comprende alrededor del 30 % de las exportaciones del sector agrícola.

Adicionalmente, los datos del Censo Agropecuario del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) del 2014, muestra que, con respecto al último censo, realizado en 1984. A pesar de la disminución en las actividades agropecuarias, para el 2014 se contabilizaron 93 017 fincas en 2.4 millones de hectáreas, lo que implicaba un 47.1 % del territorio nacional. De todas esas fincas, el 53 % de dedica a la producción pecuaria, 41 % a la agricultura, 5 % manejo y protección del bosque y el 1 % a otros usos (INEC, 2017). Es importante notar que dichas cifras se pueden asociar a la cantidad de desechos y residuos que se generan en el sector agropecuario.

Asimismo, se puede observar por medio de los datos del CENAGRO 2014, una comparación entre la extensión en 1984 y en 2014 de ciertos cultivos, los cuales se muestran en el Cuadro 2.2, datos que exponen el alto crecimiento de los sembradíos de piña y tomando como referencia el valor del MAG, que por cada hectárea sembrada, se genera 250 t de rastrojo, se podría decir que para 2014 se tenía 8 415 000 t de rastrojo, el cual no ha sido aprovechado.

Cuadro 2.2. Extensión sembrada en hectáreas de diferentes cultivos en 1984 y 2014 (INEC, 2017)

Cultivo	Extensión sembrada /(ha)	
	1984	2014
Palma aceitera	16 830	66 420
Piña	2 474	37 660
Banano	32 316	51 758
Caña de azúcar	47 287	65 062
Naranja	2 765	19 596
Café	89 882	84 133

Cuadro 2.3. Porcentaje de las exportaciones comprendido por el sector agrícola, alimentario y maderero de los últimos seis años

Sector	Porcentaje del total de exportaciones / (%)						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Agrícola	22.0	21.2	22.8	25.4	26.1	25.5	24.5
Alimentario	12.4	12.6	12.7	15.3	14.9	14.6	13.5
Maderero	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6

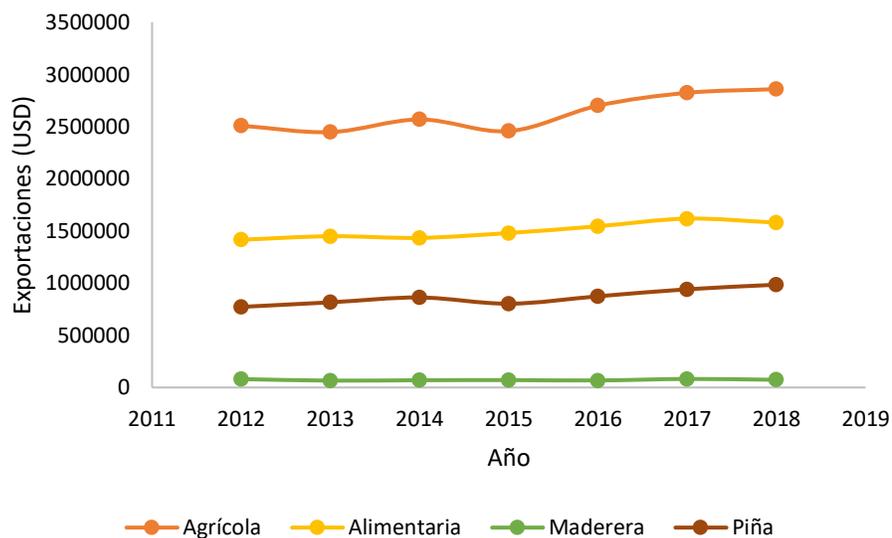


Figura 2.4. Exportaciones agrícolas, alimentarias y maderera de los últimos 6 años (PROCOMER, s.f.)

2.3 USOS

Como se explicó anteriormente, existe una vasta variedad de biomásas, sin embargo, para la utilización en procesos termoquímicos, sólo se pueden utilizar las siguientes:

- Agrícolas no comestibles, residuos forestales
- Semi-biomasa (biomasa contaminada y desechos biomásicos industriales)
- Cultivos energéticos de corta rotación
- Desechos humanos y animales

Actualmente, el uso de biomasa sólida se dirige principalmente a la producción de calor y energía. En la Figura 2.5, se puede observar las diferentes rutas por las cuales se puede obtener energía a partir de fuentes biomásicas.

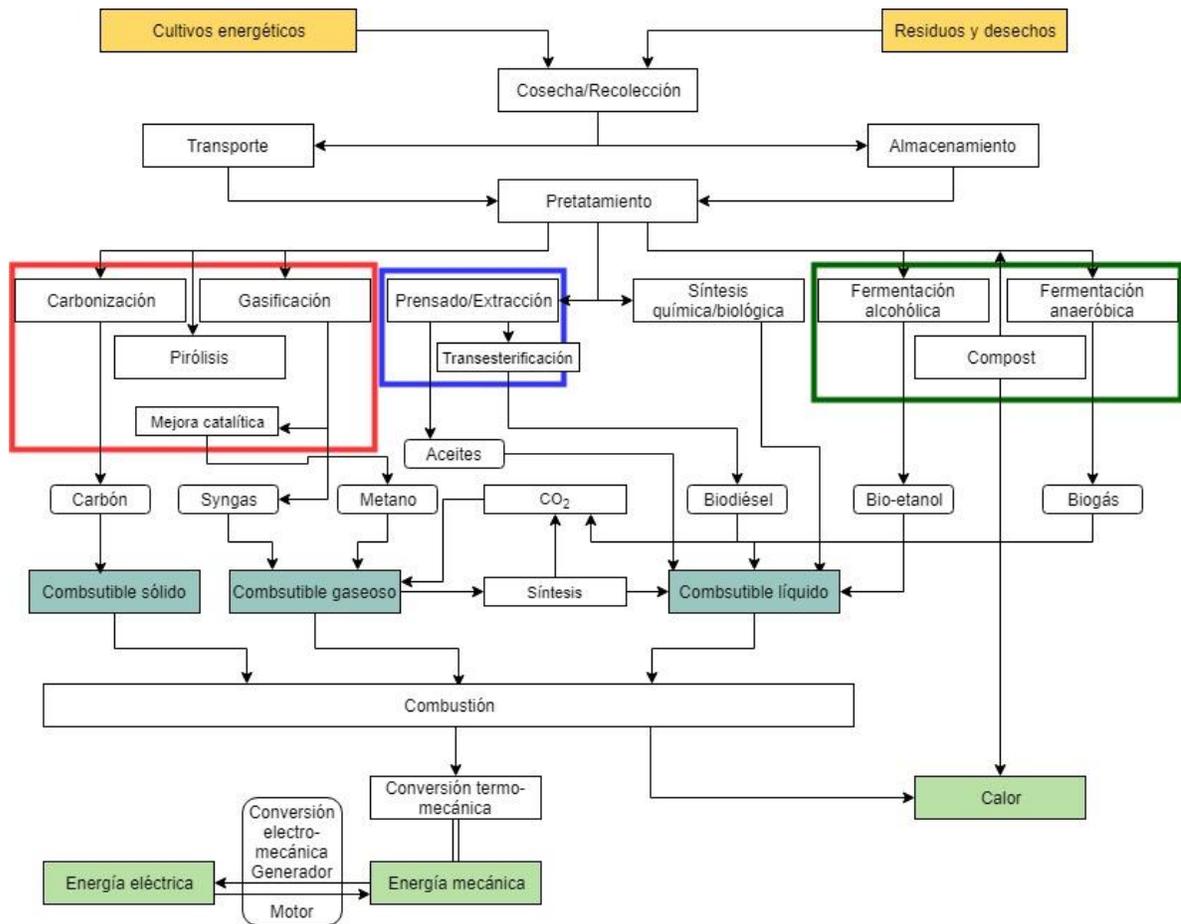


Figura 2.5. Rutas para obtención de energía a partir de biomasa (Vakkilainen, 2017)

La conversión de biomasa en energía o calor se podría dar por medio de diferentes rutas, como la termo-química (encerradas en un recuadro rojo en la Figura 2.5), físico-química (recuadro azul de la Figura 2.5) o bioquímica (recuadro verde en la Figura 2.5). En el caso de los procesos termo-químicos se requiere el uso de calor, en los bioquímicos, las moléculas de la biomasa se separan en moléculas más pequeñas por medio del uso de bacterias o enzimas y por último, en el caso de los procesos físico-químicos se utiliza principalmente energía mecánica por medio de maquinaria (Vakkilainen, 2017).

Para el 2009, según la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), la biomasa era principalmente utilizada con uso residencia y calentamiento, este comportamiento se da generalmente en los países desarrollados. En la Figura 2.6, se puede observar la distribución del uso de biomasa.

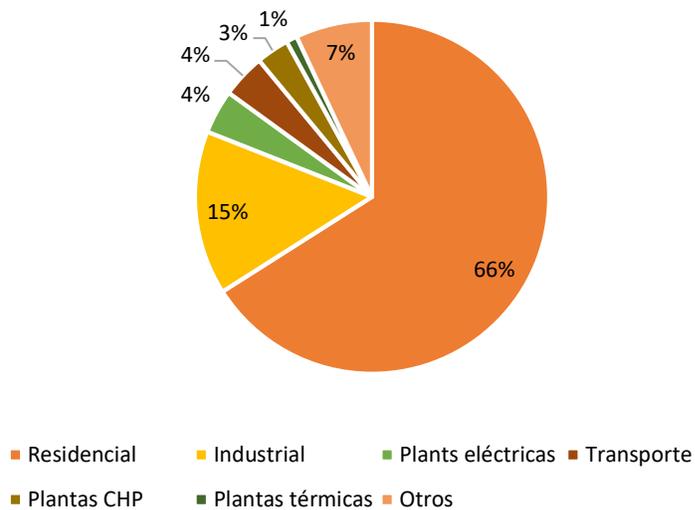


Figura 2.6. Distribución del uso de biomasa para el 2009, según IEA (Vakkilainen, 2017)

2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Se han realizado estudios donde se comparan diferentes biomásas, con el carbón, para ver sus ventajas y desventajas en el uso de éstas como combustibles.

Ventajas (Vassilev, Vassileva, & Vassilev, 2015):

- Fuente renovable
- Fuentes carbono neutrales
- Transición a una economía baja en carbono
- Aprovechamiento de partes no comestibles de la biomasa
- Bajos contenidos de cenizas
- Recursos biodegradables con alta reactividad y bajas temperaturas de ignición y combustión.
- Recursos económicos para producción de biocombustibles, fertilizantes, agentes neutralizadores
- Decremento en emisiones peligrosas, como metano, dióxido de carbono, NO_x y SO_x
- Reducción de los residuos y desechos

- Altos valores de materia orgánica, hidrógeno, carbohidratos estructurales y extractivos.
- Valores bajos de carbono fijo, cenizas, nitrógeno, azufre y silicio.

Desventajas (Vassilev, Vassileva, & Vassilev, 2015)

- Competencia con biomásas comestibles
- Falta de monitoreo y control de la producción de biocombustibles (certificación de origen de la biomasa)
- Alto contenido de humedad
- Costos de transporte, almacenamiento y pretratamientos
- Estacionalidad de algunas biomásas
- Problemas durante el procesamiento, como aglomeración, corrosión, erosión, formación de depósitos
- Baja densidad aparente, pH y temperatura de fusión de cenizas
- Composición y propiedades muy variables

3 CAPÍTULO 3: LA PIÑA

En este capítulo se hace un acercamiento a la materia prima a utilizar en este proyecto, la cual corresponde a la piña. Inicialmente, se hace un abordaje de la planta y su cultivo. Seguidamente, se hace un enfoque a la problemática que se busca solucionar por medio de este estudio. Por último, se presenta una revisión sobre lo que se ha hecho en Costa Rica y a nivel mundial, en los últimos años con respecto a las posibles soluciones.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PIÑA

La piña, *Ananas comosus L* (su nombre científico), pertenece a la familia *Bromeliaceae*, por su excelente sabor hay quienes la llaman la reina de las frutas y es uno de los cultivos frutales más importantes alrededor del mundo. Su consumo es principalmente la fruta fresca y jugo, igualmente fresco, pero hay países en los que utiliza el jugo fermentado para la producción de vinagre. Los residuos de la producción de jugo se utilizan como alimento para cerdos y el corazón se utiliza como materia prima para confites. Hay lugares, como Filipinas y Taiwán que utilizan las hojas para producir fibras para ropa, mientras que, en otros lugares, se aprovechan para la producción de papel (Baruwa, 2013).

Esta planta herbácea tiene entre 1 m y 1,5 m, tanto de altura como de circunferencia, y está compuesta por hojas gruesas que pueden llegar o no a ser espinosas. Generan pocas semillas, por lo que su cultivo, se basa en la siembra de los brotes de la planta, aunque también, las coronas de la fruta se pueden utilizar para este propósito. El ciclo de crecimiento de la piña tarda entre 14 y 20 meses y se divide en tres etapas: plantación de los brotes y crecimiento (6 a 7 meses), floración hasta cosecha (5 a 6 meses) y por último la producción de los “hijos” para replantación (3 a 6 meses) (UNCTAD-INFOCOMM, 2016). En la Figura 3.1 se puede observar una planta de piña y cada una de sus partes.

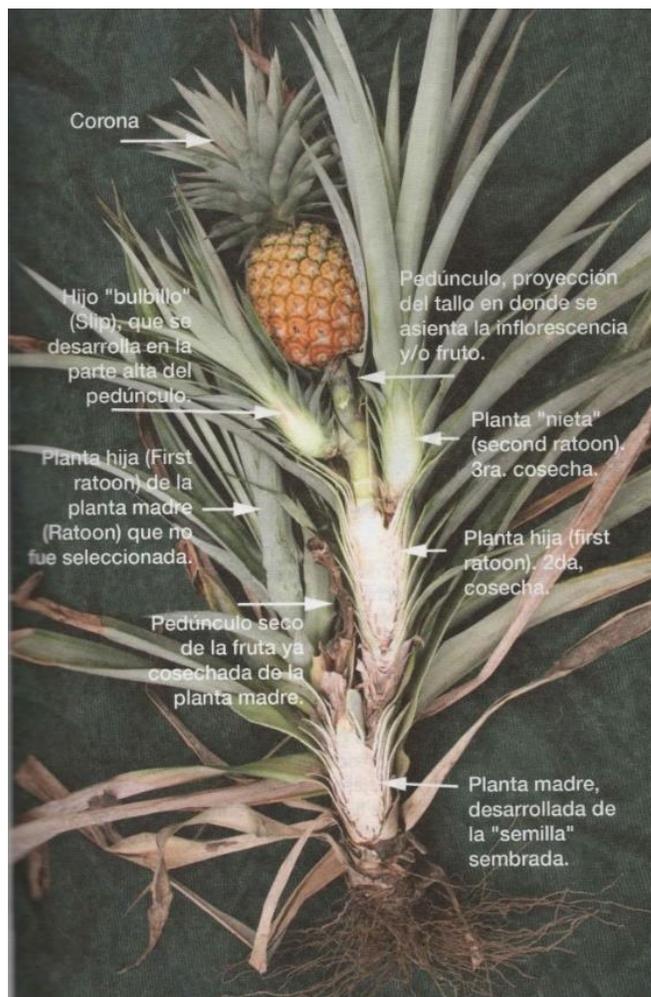


Figura 3.1. Anatomía de la piña (Garita, 2014)

3.1.1 Requerimientos para el cultivo de piña

Suelo

El cultivo de piña se da en zonas tropicales en alturas que van desde los 0 a 6 m.s.n.m. El suelo para esta fruta debe tener un buen drenaje y debe ser aireado, dado que si es compacto podría generar enfermedades en la raíz de la planta y pobre absorción de nutrientes. El pH de la tierra debe estar en el rango de 4,5 a 5,5 (INTAGRI, s.f). En el Cuadro 3.1 se muestran los diferentes nutrientes que deberían de estar presentes en el suelo para el óptimo crecimiento de las *Ananas cosmosus L.*

Cuadro 3.1. Cantidad de nutrientes a estar presentes en los suelos para el cultivo de piña (INTAGRI, s.f)

Nutriente	Unidad	Bajo	Medio	Óptimo	Alto
Calcio	cmol/L	≤ 4.0	4-6	6-15	≥ 15
Magnesio	cmol/L	≤ 1.0	1-3	3-6	≥ 6
Potasio	cmol/L	≤ 0.2	0.2-0.5	0.5-0.8	≥ 0.8
Fósforo	mg/L	≤ 12	12-20	20-50	≥ 50
Hierro	mg/L	≤ 5	5-10	10-50	≥ 50
Cobre	mg/L	≤ 0.5	0.5-1	1-20	≥ 20
Zinc	mg/L	≤ 2	2-3	3-10	≥ 10
Manganeso	mg/L	≤ 5	5-10	10-50	≥ 50
Boro	mg/L	≤ 0.2	0.2-0.5	0.5-1	≥ 1
Azufre	mg/L	≤ 12	12-20	20-50	≥ 50
Materia orgánica	%	≤ 2	2-5	5-10	≥ 10

Temperatura y luminosidad

Este factor es considerado como la principal limitante del cultivo de piña, ya que la planta no puede sobrevivir a heladas y el crecimiento se ve retardado cuando la temperatura es menor que la media. Se dice que, a temperaturas menores a los 21 °C, el crecimiento de la planta es nulo y la máxima debería estar entre los 30 °C y 31 °C.

También se puede hablar sobre la luminosidad, donde algunos autores relacionan tanto la temperatura como luminosidad con la altura. Señalan que, a mayor altitud, ambos factores serán menores, por lo que, a mayor elevación, los cultivos pierden vigor. Asimismo, hay otros aspectos a considerar la irradiación, calidad y duración de la luz, lo cual afecta la maduración de la fruta y factores como la acidez y la concentración de ácido ascórbico (Garita, 2014).

Precipitaciones

El cultivo de piña se caracteriza por tener un consumo de agua moderado, por lo que el nivel de agua, debido a precipitaciones, debe ser evacuado con rapidez. Debido a la poca exigencia de agua, ésta se adapta a lugares con condiciones donde existe cierta restricción de precipitaciones (Garita, 2014).

3.2 PROBLEMÁTICA DE LA ACTIVIDAD PIÑERA: RASTROJO DE PIÑA

La problemática de esta actividad radica en la parte ambiental, desde dos perspectivas básicas: contaminación por la descomposición de los rastrojos y por la aplicación de herbicidas para desecar el rastrojo (Arauz, 2011) . Se conoce como rastrojo de piña al residuo, que incluye tallos, hojas y raíces, luego de la cosecha de la fruta (González L. , 2012). Encadenado a este problema de disposición del rastrojo, está la proliferación de la mosca de establo *Stomoxys calcitrans*, la cual cumple su ciclo de vida en los rastrojos. Esta mosca es considerada un parásito del ganado, aunque se alimenta de animales de sangre caliente, dentro de los cuales están los humanos; no transmite ninguna enfermedad, pero afecta el bienestar animal, causando pérdidas económicas al sector ganadero (Ministerio de Salud, 2017).

3.2.1 Caracterización del rastrojo de piña

La producción de piña en Costa Rica ha ido creciendo con los años. Pero con esto también aumenta la cantidad de desechos generados. Aproximadamente, se tiene una relación de 3:1 de la masa de residuo y la masa del producto. Asimismo, se estima que por cada hectárea cultivada de piña se generan entre 250 t y 300 t de residuos, entre los que se incluyen tallos, hojas y raíces que quedan al eliminar el cultivo, esto es lo que se conoce como rastrojo (González L. , 2012).

Por tanto, para encontrar una posible solución a la problemática de los rastrojos, es necesario conocer su composición. En el Cuadro 3.1 se observa la distribución de carbohidratos estructurales de las diferentes partes que se desechan de la planta. Cabe resaltar que los autores no indican la variedad de piña utilizada para el análisis, por lo que esa composición podría variar de una a otra, dado que se tiene otro estudio realizado por Amador que muestra valores distintos, ver Cuadro 3.3.

Cuadro 3.2. Composición de carbohidratos estructurales y ceniza de las diferentes partes de la planta (López-Herrera, WingChing-Jones, & Rojas-Bourrillón, 2014)

Parte de la planta	Composición (%)			
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Cenizas
Planta entera	37.7	29.9	6.6	7.3
Rastrojo	25.8	17.3	3.4	9.5
Corona	59.0	17.5	3.3	7.9
Tallo	-	-	5.3	3.4
Raíces	-	-	17.5	15.9
Cáscara y pulpa	22.2	27.7	4.7	8.8
Pulpa	25.4	29.5	5.3	3.0
Cáscara	10.1	5.8	7.8	5.2

Cuadro 3.3. Caracterización del rastrojo de piña (Amador, s.f)

Parámetro	Valor
Humedad (%)	85
Sólidos volátiles (%)	93
Hemicelulosa (%)	17.7
Celulosa (%)	25.8
pH	4.5

3.2.2 Situación actual en Costa Rica

El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), en su “Manual técnico de eliminación de rastrojos de piña” (2012), menciona dos formas para la eliminación del mismo. La primera, conocida como la convencional, indica que se debe aplicar desecante o herbicida a la planta y luego de esto hacer la incorporación mecánica del material al suelo. Sin embargo, al utilizar herbicidas existe un mayor riesgo ambiental; es importante mencionar que, para hacer uso de esta técnica, los herbicidas deben estar registrados y autorizados por el Servicio Fitosanitario del Estado. La otra forma de eliminación del rastrojo es incorporarlo al suelo, mecánicamente, sin hacer uso de herbicidas, de esta forma se aumenta la fertilidad y la capacidad de retención de humedad. Debido al tamaño que puede alcanzar la planta y por la morfología de las hojas, se puede hacer una chapia manual o mecánica antes de su incorporación al suelo. Esto se puede realizar tanto para el caso en que se aplica herbicida como cuando no se aplica este producto (González L. , 2012).

Las prácticas mencionadas en lo más actualizado que ha establecido el MAG, sin embargo, en un estudio realizado por la Universidad de Costa Rica, se habla de tres métodos para la disposición del rastrojo. El primero hace referencia a abandonar éstos residuos en campo, lo que toma aproximadamente 13 meses para su descomposición, esto trae consigo problemas como la posibilidad de multiplicación de los insectos y presencia de enfermedades; el segundo método consiste en quemar el rastrojo y el tercero se refiere a la trituración y aplicación de herbicida para quemarlos y su posterior incorporación al suelo (UCR, 2018).

Desde 2011, en el Estado de la Nación se ha hecho hincapié en la necesidad de encontrar una solución para el rastrojo de piña y la problemática alrededor del mismo; en dicho informe se comentaba sobre posibles usos, como fuente de fibra para textiles y materiales constructivos, así como el aprovechamiento de la bromelina, la cual es una enzima que está presente en altas cantidades en el rastrojo. Esta tiene usos en varios campos, como farmacéuticos e industriales (Arauz, 2011). Sin embargo, años después, sigue sin existir una política clara para la disposición y posible revalorización de este desecho.

3.3 POSIBLES TRATAMIENTOS PARA EL RASTROJO DE PIÑA

Debido a la cantidad de desechos que se generan, se han estado estudiando alternativas para reducir el impacto de estos, tanto dentro como fuera de Costa Rica. Por ejemplo, dentro de Costa Rica, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) implementó un sistema continuo a escala de laboratorio para obtener biogás a partir de rastrojo. Este estudio lo realizaron con un sustrato sólido (rastrojo triturado) y con sustrato líquido. Los resultados para el primer escenario (sólido) fue la generación 25.7 m³ de biogás por cada tonelada de hoja, y en el caso líquido se obtuvo 16 m³ por cada tonelada de hoja. En el Cuadro 3.4 se muestran los resultados de la composición del biogás obtenido con cada material (Arce, Hernández, & Amador, s.f).

Cuadro 3.4. Resultados obtenidos del estudio de biogás a partir de rastrojo de piña (Arce, Hernández, & Amador, s.f)

Sustrato	Caracterización del biogás obtenido				
	Metano (%)	Dióxido de carbono (%)	Oxígeno (%)	Sulfuro de hidrógeno (ppm)	Monóxido de carbono (ppm)
Jugo de rastrojo	52.8	26.7	1.4	87.6	211
Rastrojo triturado A	53.3	28.4	1.4	141.8	235.4
Rastrojo triturado B	52.2	28.7	1.5	117.5	238.4

Por otra parte, la Universidad Técnica Nacional (UTN) ha incentivado alianzas para proyectos productivos a partir de los desechos de la piña, como lo son el cultivo de hongos ostra, obtención de bromelina y la extracción de nanocelulosa. En el primer caso, luego de varios ensayos, se desarrolló un protocolo para producción de hongo ostra a partir de la corona de la piña. En este proyecto se han visto involucradas diferentes entidades, como CANAPEP e incluso la Embajada de Holanda. En 2016, se inició una propuesta para extraer bromelina a partir del jugo residual del proceso de exportación de piña, en la actualidad se trabaja en la caracterización y pureza de la bromelina obtenida (CANAPEP, 2017).

Fuera de Costa Rica, se ha estudiado la valorización de los residuos de la piña para la extracción de compuestos bio-activos y glucósidos por medio de autohidrólisis. Los glucósidos obtenidos tienen varias aplicaciones, por ejemplo, como aditivos de comida, prebióticos y preservantes naturales. Por medio de esta investigación, el proceso de autohidrólisis es una técnica prometedora para valorización de los residuos, donde se logró obtener una alta extracción de glucosa y fructosa a una temperatura de 150 °C. además de extracción de polifenoles a 200 °C. Asimismo, los compuestos que se lograron extraer mostraron una alta actividad antioxidante comparado contra antioxidantes comerciales (Sepúlveda, Romani, Aguilar, & Teixeira, 2018).

Por otro lado, dos Santos et al estudiaron la obtención de nanocristales de celulosa a partir de las hojas de piña. La extracción se realizó por medio de una hidrólisis ácida con ácido

sulfúrico a 45 °C. Obtuvieron nanocristales con una alta estabilidad térmica (225 °C), cristalinidad del 73 %, una longitud promedio de 249.7 ± 51.5 nm y un diámetro promedio de 4.45 ± 1.41 nm. Estas fibras serían de utilidad en la manufactura y refuerzo de materiales nanocompuestos (dosSantos, et al., 2013).

Además de los residuos de campo, la actividad piñera genera residuos en las plantas procesadoras de fruta. En un estudio reciente, se buscó obtener bio-etanol y extraer bromelina. Los desechos sólidos de la fruta (cáscara y corona) fueron molidos, tamizados y prensados, con lo que se obtuvo un desecho líquido y otro sólido. El líquido fue sometido a un proceso de centrifugación, microfiltración y ultrafiltración; de este proceso el retentado se utilizó para la extracción de bromelina para lo cual fue inicialmente liofilizado, por otro lado, el permeado se utilizó para la fermentación y obtención de bioetanol. El residuo sólido se utilizó como fertilizante o alimento para animales. La extracción de la bromelina de líquido se logró sin adicionar agua o algún otro solvente. A pesar de que se deberían realizar más estudios con relación a plantas piloto, éste propone un proceso integrado para valorización de los desechos (Seguí-Gil & Fito-Maupoe, 2018).

Otra posibilidad que ha sido estudiada para el manejo de los residuos de la piña ha sido la densificación (generación de pellets) para ser utilizado como alimento animal. Se estudió un rango de humedad de 35 a 50 %, lo cual no tuvo un efecto significativo en las características físicas (ensayo de friabilidad, densidad real y aparente y porosidad) de los pellets, excepto por la densidad real. Se estableció la humedad de 35 % como la mejor, dado que se obtuvo el menor valor de friabilidad y el mayor de densidad real y porosidad. Una ventaja de la pelletización es que se reducen costos y problemas relacionados al transporte y almacenamiento (Zainuddin, Roshnad, Mohd-Noriznan, & Dahlan, 2014). Dentro de Costa Rica, también se ha estudiado la calidad de pellets producidos a partir de rastrojo de piña, específicamente, las hojas de la planta; además de otras biomásas. Con el fin de evaluar la calidad, se les midieron propiedades mecánicas, físicas y energéticas. Para el caso específico de los pellets de piña, en cuanto a sus propiedades mecánicas se obtuvo que soportan una carga máxima aproximada de 300 N. Dentro de las propiedades físicas estudiadas están la

absorción de humedad y la densidad (en este caso no se pudo medir la densidad aparente), lo que dio como resultado 8.9 % y 1.23 g/cm³, respectivamente. Asimismo, se midieron propiedades energéticas, como el valor calórico neto con un valor de 11.6 kJ/kg, un contenido de cenizas de 6.1 %, materia volátil 73.1 %, contenido de humedad de 10.9 % y índice de valor combustible de 242; siendo éste una medida para determinar la calidad de la biomasa como combustible (Tenorio, Moya, Tomazello, & Valaert, 2015).

4 CAPÍTULO 4:

GASIFICACIÓN

En este capítulo se hace un acercamiento al proceso de gasificación. Inicialmente, se hace referencia a los fundamentos del mismo y a las etapas que lo componen. Asimismo, se mencionan los parámetros que tienen influencia en el proceso. Los diferentes tipos de reactores disponibles dependiendo de los requerimientos y los productos que se pueden obtener durante la gasificación.

4.1 DEFINICIÓN DE GASIFICACIÓN

El proceso de gasificación es una ruta termoquímica por la cual se puede transformar la biomasa en combustible, ya sea líquido o gaseoso. Lo que lo diferencia de la combustión es que en este caso la reacción se da en un ambiente deficiente de oxígeno (Basu, 2010).

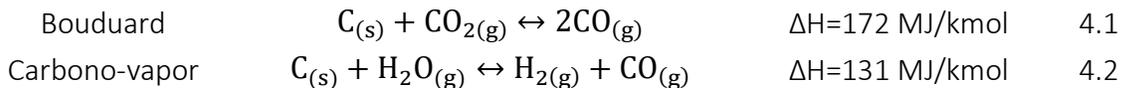
La gasificación se realiza con el objetivo de convertir combustibles que contengan una fuente primaria de carbono, en una mezcla combustible gaseosa. Las razones por las cuales se desea esa conversión se enlistan a continuación (Jenkins, 2015):

- Los combustibles gaseosos se pueden quemar de una manera más fácil que los combustibles sólidos, además de que producen una cantidad muy pequeña de humo.
- La combustión de gases produce una cantidad mínima de ceniza, sino que nula.
- Las impurezas son más fáciles de limpiar de una corriente gaseosa que de una líquida.
- Los gases se pueden almacenar en tanques o en tuberías, dentro de un amplio rango de presión.

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico en medio de la combustión (exceso de oxígeno), y de la pirólisis (ausencia de oxígeno). Por medio de éste, se logra convertir a combustibles entre el 60-90 % de la materia inicial (Kuhn, A, 2018).

4.1.1 Reacciones involucradas en el proceso de gasificación

Si se considera el carbono como una fuente primaria para producción de gas, las siguientes reacciones permiten a ilustrar los principios básicos de gasificación:



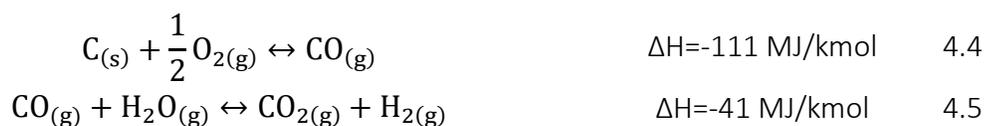
Ambas reacciones 4.1 y 4.2, como se puede observar, son endotérmicas, por lo que requieren calor y elevadas temperaturas para que sucedan a velocidades razonables. El calor se puede proveer de dos maneras: directa o indirecta. La primera se refiere a cuando el calor es provisto por una reacción exotérmica *in situ*, y la segunda manera es cuando el calor se obtiene de alguna fuente externa, por ejemplo, algún proceso de combustión externo. En el caso de obtener el calor de forma directa, la principal reacción es la siguiente:



La reacción 4.3 provee el calor necesario para las reacciones 1.1 y 1.2, además del dióxido de carbono necesario para la reacción de Boudouard.

En caso de utilizar aire, el nitrógeno (componente principal del aire) será considerado como un inerte, dado que no participa de la reacción y reduce la cantidad de energía que la reacción de oxidación puede proveer. Otra desventaja de utilizar aire es que el nitrógeno funcionará como un diluyente en las reacciones subsecuentes. Por tanto, si se compara la mezcla gaseosa obtenida al utilizar aire y oxígeno puro, la que contiene nitrógeno producirá un gas de bajo poder calorífico.

Otras reacciones exotérmicas que pueden contribuir a la energía requerida por las reacciones endotérmicas son la reacción 4.4 y la reacción 4.5: *water gas shift (WGS*, por sus siglas en inglés).



La reacción WGS también se puede utilizar post-gasificación para ajustar la relación H_2/CO ; además, ésta ayuda a convertir el monóxido de carbono en dióxido de carbono e incrementa el contenido de hidrógeno en la mezcla gaseosa.

4.2 ETAPAS DE GASIFICACIÓN

La gasificación se puede dividir en tres etapas: secado, devolatilización y gasificación; ésta por su parte es una combinación de reacciones de pirólisis y oxidación. En este proceso, las especies químicas son calentadas hasta temperaturas que van desde 500 °C hasta 900 °C, en presencia de aire, vapor o dióxido de carbono (deLasa, Salaices, Mazumder, & Lucky, 2011).

4.2.1 Etapa de secado

La calidad del producto de gasificación varía dependiendo de la materia prima que se use. Para mejorarla, la biomasa se debe someter a pretratamientos, como secado y/o densificado. Esto debido a que, entre mayor sea la cantidad de agua presente en la muestra, se tendrá una pérdida energética, y el producto final de menor calidad. Esta etapa se da a una temperatura alrededor de 100 °C y dado que ésta no es tan elevada, la biomasa no sufre descomposición (Sansaniwal, Pal, Rosen, & Tyagi, 2017). La reacción que se da en esta parte del proceso se observan en la reacción 4.6.



4.2.2 Pirólisis

Esta etapa se da en ausencia de oxígeno y/o aire. La biomasa se transforma en carbón sólido, alquitranes y gases. La proporción en la que éstos se forman dependerá de la naturaleza de la biomasa que se esté utilizando.

A una temperatura alrededor de 300 °C, se empieza a dar la reducción del peso molecular de la materia prima, principalmente la celulosa amorfa. Cuando la temperatura aumenta, la celulosa cristalina se empieza a descomponer y forma el *char*, alquitrán y productos gaseosos. Entre los 300-500 °C, la lignina se empieza a descomponer y puede formar metanol, ácido acético, agua y acetona.

En general, durante la pirólisis (rango de 125 °C a 500 °C), los biopolímeros o carbohidratos estructurales que forman la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina), se convierten en carbono y moléculas medianas, conocidas como volátiles; además, se da una condensación

de hidrocarburos, por lo que se forman los alquitranes (Sansaniwal, Pal, Rosen, & Tyagi, 2017). La reacción 4.7 es la correspondiente a esta etapa del proceso.



4.2.3 Combustión

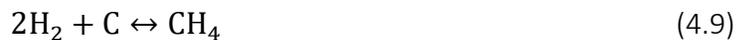
Esta parte del proceso es crítica, dado que aquí se define el tipo y calidad del producto que se va a obtener. La temperatura, la presión y el agente gasificante tienen un papel muy importante en el producto, por ejemplo, el vapor de agua se ha visto que favorece el proceso de reformado del gas; mientras que el oxígeno se reporta como el mejor agente gasificante en cuestión de generación de energía.

Durante la combustión se dan las reacciones heterogéneas entre el combustible sólido carbonoso y el oxígeno presente, lo que produce dióxido de carbono y calor, asimismo, el hidrógeno reacciona con el oxígeno, formando vapor de agua. Las reacciones que representan este proceso son la 4.3 y la 4.8.



4.2.4 Reducción

Los alquitranes formados durante pirólisis y combustión se pueden descomponer con la temperatura adecuada en la etapa de reducción. En esta parte del proceso se dan reacciones endotérmicas 4.1, 4.2, 4.5 y 4.9 para generar productos como hidrógeno, monóxido de carbono y metano (Sansaniwal, Pal, Rosen, & Tyagi, 2017).



4.3 PRODUCTOS DE LA GASIFICACIÓN

4.3.1 Gas producido (*syngas*)

La mezcla gaseosa obtenida a partir de la gasificación y otros procesos subsecuentes puede ser clasificada en tres categorías dependiendo de su poder calorífico (bajo, medio y alto). En el Cuadro 4.1 se pueden observar las diferencias entre cada una de las mezclas.

Cuadro 4.1. Características de las diferentes mezclas de gas (Jenkins, 2015)

Categoría	Rango de poder calorífico superior (MJ/m ³)	Componentes principales
Bajo	3.35-7.1	N ₂ , H ₂ , CO
Medio	9.3-20.5	H ₂ , CO, CH ₄ , hidrocarburos de bajo peso molecular
Alto	33.4-43.0	CH ₄ , hidrocarburos de bajo peso molecular

Mezcla de poder calorífico bajo

Las mezclas de este tipo se conocen, industrialmente, como gas producido o gas de agua. Se deben utilizar cerca del gasificador. No pueden ser utilizados en quemadores de gas natural convencionales (Jenkins, 2015).

Mezcla de poder calorífico medio

Sus aplicaciones son similares a los de la categoría anterior, esto debido a la baja densidad que tienen estas mezclas, por lo que los costos de compresión y bombeo son una restricción. Sin embargo, estos pueden tener cierto grado de distribución, a partir del sitio donde esté el gasificador. Se debe utilizar un quemador diseñado específicamente para este tipo de mezcla (Jenkins, 2015).

Mezcla de poder calorífico alto

Esta mezcla es rica en metano, por lo que en ocasiones se le conoce como gas natural sintético (SNG, por sus siglas en inglés). Es indistinguible del gas natural en cuestión de su contenido de energía, características de combustión y las consideraciones para su compresión. Sin embargo, para su producción se requiere una tecnología sofisticada (Jenkins, 2015).

4.3.2 Biochar

El biochar es uno de los productos obtenidos cuando la biomasa se somete a procesos termoquímicos bajo condiciones de pirólisis. Éste puede ser utilizado para la generación de calor y energía, también se puede usar como fertilizante y como secuestrador de carbono y en el caso de estar activado puede utilizarse en aplicaciones de adsorción. El uso que se le

pueda dar después del proceso de gasificación dependerá, tanto en sus propiedades químicas, como físicas.

La temperatura utilizada tiene un efecto importante en las propiedades que vaya a poseer el biochar. Éste se caracteriza por tener baja área superficial, bajo pH, alta capacidad de intercambio de cationes y alta capacidad de retención de agua. Algunas de las técnicas utilizadas para la caracterización del biochar son FTIR, XRD, XPS, SEM, TEM y TGA-DTG. Los cuatro principales ejes para el aprovechamiento del biochar son los siguientes (Amin, et al., 2016):

- Mejoramiento del suelo
- Manejo de residuos
- Mitigación del cambio climático
- Generación energética

4.3.3 *Alquitranes*

Los alquitranes son un subproducto no deseado del proceso de gasificación, por lo que su formación es uno de los mayores inconvenientes que se tienen. Por tanto, es necesario identificarlos para poder aplicar alguno de los mecanismos para reducirlos y controlarlos.

Éstos son una mezcla compleja de hidrocarburos condensables que comprenden desde anillos sencillos, hasta 5 anillos aromáticos y también hidrocarburos que contienen carbono e hidrocarburos poliaromáticos. La presencia de estos compuestos implica problemas operacionales, debido a la posible formación de aerosoles u hollín (esto por la repolimerización), asimismo, los alquitranes más pesados condensan en superficies más frías (Font, 2013).

Para la reducción de estos compuestos se tienen varios métodos, e incluso se han categorizado de diversas maneras; la primera los divide en primarios y secundarios, que es cuando se remueven dentro del gasificador o en un paso posterior a la gasificación, respectivamente (Font, 2013).

Además, según su naturaleza química, e incluso la temperatura a la cual se forman, los alquitranes se clasifican en tres clases (Font, 2013):

- Primarios: entre los 673 K y 973 K, comprenden principalmente compuestos oxigenados.
- Secundarios: entre los 973 K y 1123 K, compuestos fenólicos y olefinas.
- Ternarios: entre los 1123 K y 1273 K, compuestos aromáticos complejos.

Otra forma de clasificarlos es dependiendo de su peso molecular (Font, 2013):

- Clase 1: son indetectables en el GC.
- Clase 2: compuestos heterocíclicos que por lo general tienen alta solubilidad en agua, como fenol y cresol.
- Clase 3: compuestos aromáticos de un anillo, como xileno y tolueno.
- Clase 4: compuestos aromáticos de dos a tres anillos, como naftaleno.
- Clase 5: compuestos aromáticos con cuatro o más anillos, como el fluorenteno.

Además de los problemas operacionales que se pueden dar por la presencia de alquitranes, estos son dañinos para el ser humano debido a su naturaleza carcinógena. Cuando se utiliza biomasa como materia prima para el proceso de gasificación, se promueve la formación de estos compuestos, debido a la baja cantidad de carbono fijo y la alta humedad y materia volátil que la caracteriza.

La lignina, siendo uno de los carbohidratos estructurales de la biomasa, debido a su naturaleza aromática, es considerada como un precursor alquitranes. Se dice que la formación de compuestos como fenol y benzofurano se deben principalmente a la descomposición de la lignina, mientras que los compuestos oxigenados, como cetonas, aldehídos y alcoholes, se atribuye a la descomposición de la celulosa (Zhou, Dichiara, Zhang, Zhang, & Zhou, 2018).

4.4 TIPOS DE GASIFICADORES

Existen diferentes tipos de reactores, los cuales deben cumplir con una serie de características (Jenkins, 2015):

- Deben soportar temperaturas elevadas y presión.
- Deben ser un contenedor seguro de reactivos y productos.
- Deben manejar flujos de sólidos.
- Adecuada agitación de los reactivos y tiempo suficiente para asegurar altos niveles de conversión.
- Vigilancia de la temperatura para control de la distribución de calor, reactividad y cenizas.

Además de las características ya mencionadas, se debe tomar en cuenta la aplicación que se le dará al gas producido, el tamaño y escala de la operación y la disponibilidad y naturaleza de la biomasa (Jenkins, 2015).

Se clasifican en dos grandes: lecho fijo y lecho fluidizado. Además, dependiendo del flujo del aire los de lecho fijo se puede clasificar en descendentes, ascendentes y cruzados. En la Figura 4.1 se observa un esquema de los tipos de gasificadores para biomasa.

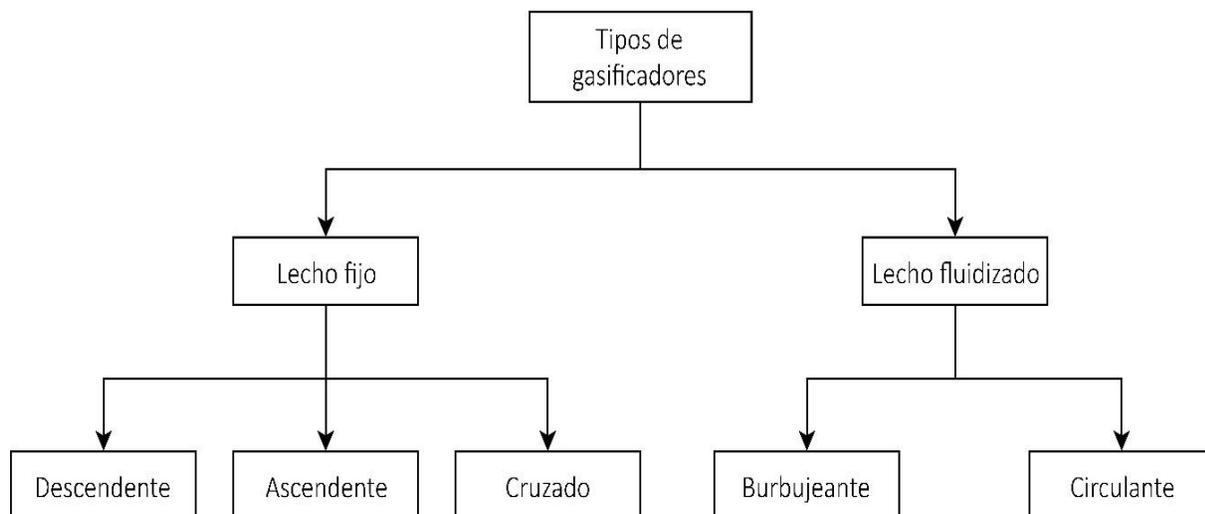


Figura 4.1. Tipos de gasificadores (Sansaniwal, Pal, Rosen, & Tyagi, 2017)

Es importante destacar que el tipo de gasificador a utilizar, también, depende del rango de aplicación, lo cual se puede observar en la Figura 4.2.

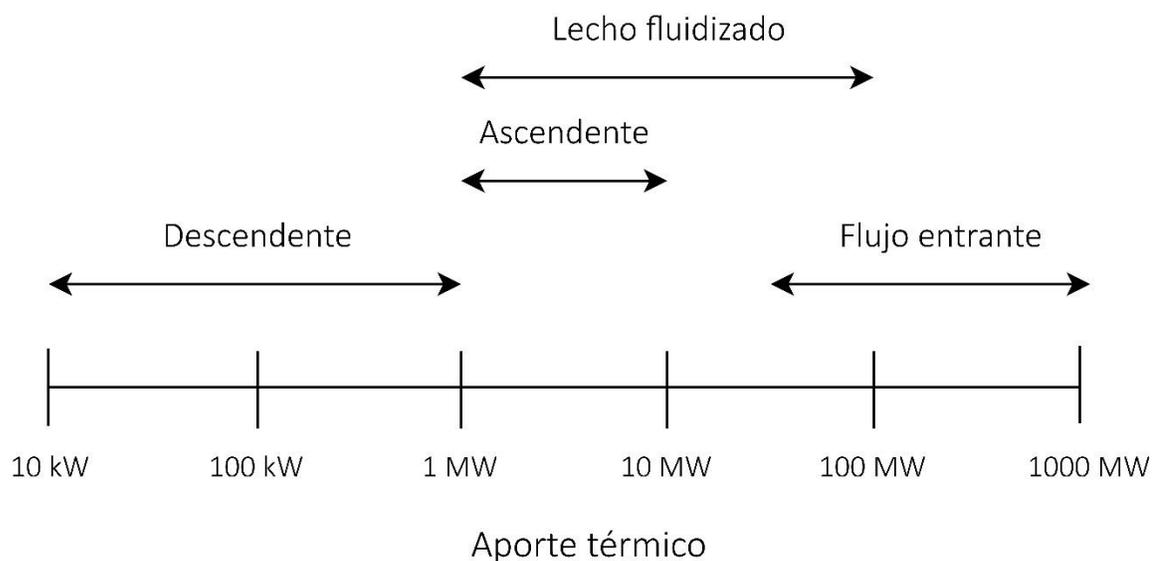


Figura 4.2. Rango de aplicación dependiendo del tipo de reactor (*Basu, 2010*)

4.4.1 Reactores de lecho fijo

En estos reactores, el combustible está soportado sobre una rejilla. A escala pequeña, no son muy costosos, lo que los hace atractivos, sin embargo, la transferencia de calor y la agitación que se da a través del lecho no es la mejor, lo que dificulta la distribución uniforme del combustible, temperatura y composición del gas. Otra desventaja es que se pueden formar aglomerados durante el proceso, por lo que la gasificación de biomasa no es muy efectiva en este tipo de reactores (*Basu, 2010*).

Gasificadores de lecho ascendente

En este tipo de reactor, la biomasa es alimentada en la parte superior del reactor, mientras que el agente gasificante, fuere oxígeno, aire o vapor, se introduce en la parte inferior, por tanto, se tiene un flujo a contracorriente (entre la biomasa y el agente) (*Kuhn, A, 2018*). En la Figura 4.3, se muestra un esquema del gasificador de lecho ascendente y sus diferentes etapas.

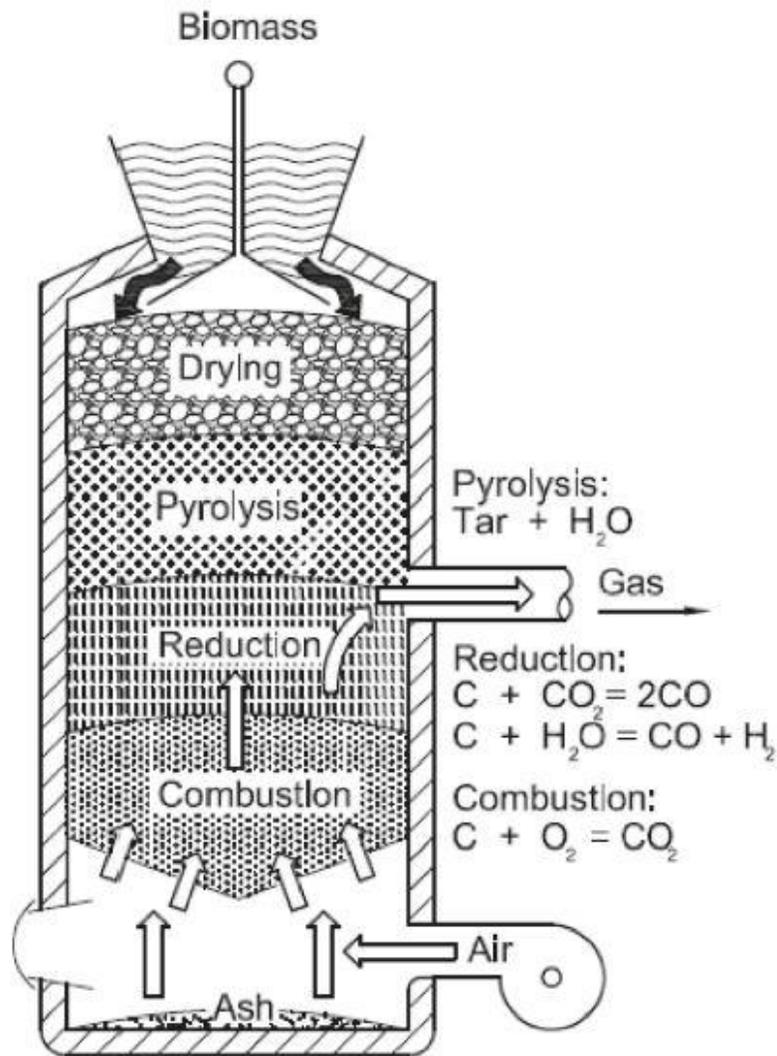


Figura 4.3. Esquema de un gasificador de lecho ascendente (deLasa, Salaices, Mazumder, & Lucky, 2011).

Gasificadores de lecho descendente

A diferencia del ascendente, el agente gasificante y la biomasa van en la misma dirección, por tanto, el flujo es co-corriente. Entre los diferentes tipos de gasificadores, éste es el que cuenta con la menor producción de alquitranes, debido a que el gas que se produce pasa por una zona de alta temperatura, además, pasa por una cama de ceniza caliente, lo que promueve condiciones favorables para reacciones de craqueo (Basu, 2010). En la Figura 4.4

se puede observar un esquema de un gasificador de este tipo y la distribución de las diferentes etapas.

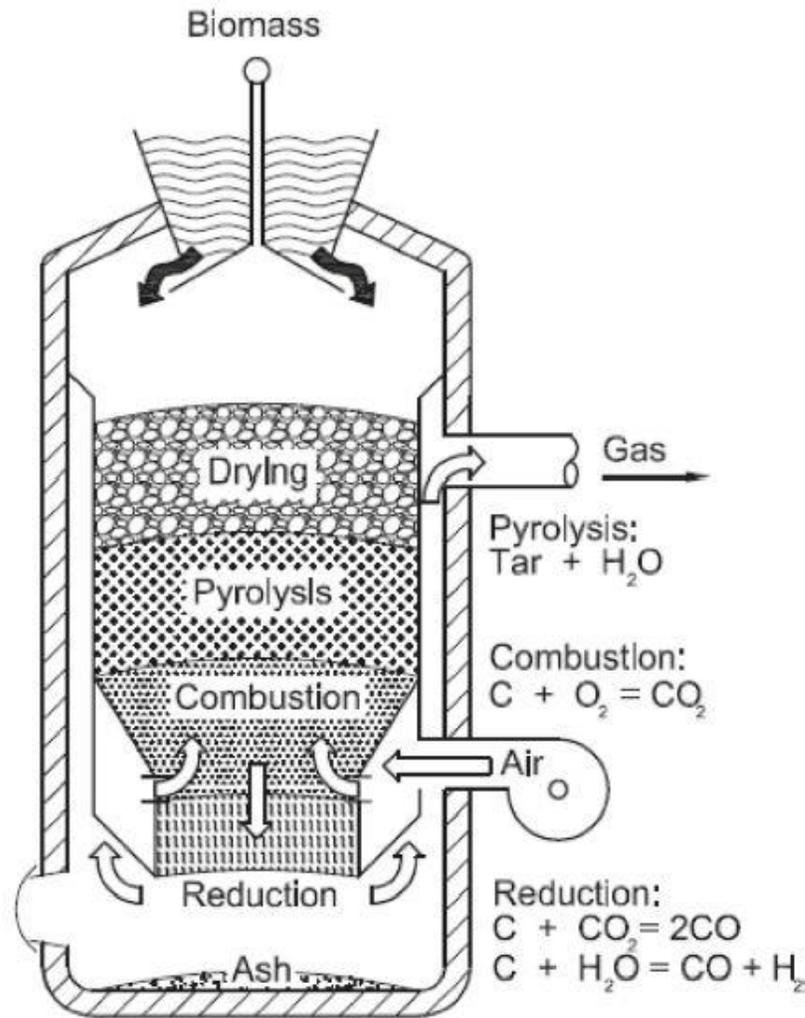


Figura 4.4. Esquema de un gasificador descendente (deLasa, Salaices, Mazumder, & Lucky, 2011).

Gasificadores crossdraft

En un gasificador tipo *crossdraft* el aire entra a alta velocidad a través de una tobera, lo que induce a la circulación y flujo a través del lecho de combustible y *char* (Guangul, Sulaiman, & Ramli, 2012). Éstos tienen una menor eficiencia energética y una alta producción de alquitranes (Kuhn, A, 2018). En la Figura 4.5 se observa un diagrama de un gasificador *crossdraft*.

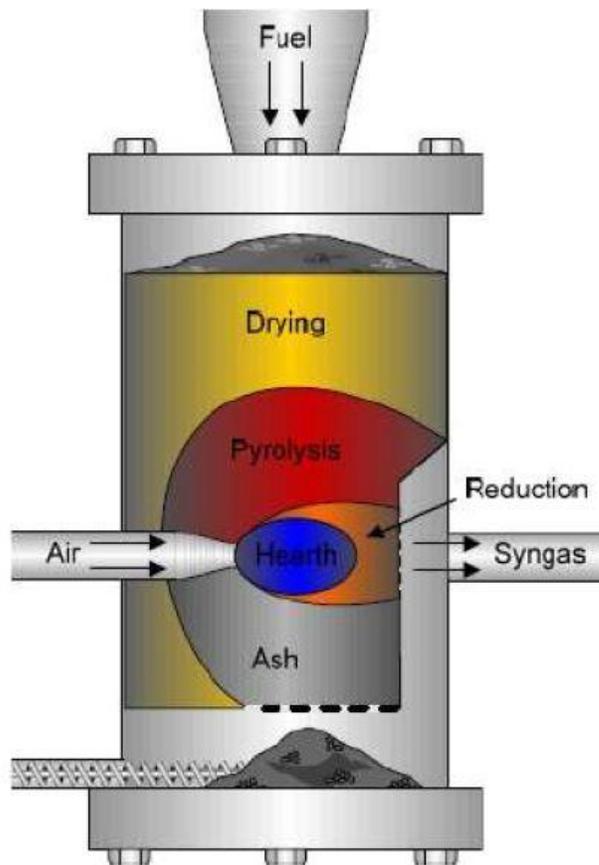


Figura 4.5. Esquema de un gasificador *crossdraft* (Kuhn, A, 2018)

En el Cuadro 4.2 se enlistan ventajas y desventajas de los tres tipos de gasificadores de lecho fijo que se mencionaron anteriormente.

Cuadro 4.2. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de reactor de lecho fijo (Rajvanshi, 2014)

Tipo de gasificador	Ventajas	Desventajas
Ascendente	<ul style="list-style-type: none"> – Baja caída de presión – Buena eficiencia térmica – Pequeña formación de escoria 	<ul style="list-style-type: none"> – Muy sensible al alquitrán y humedad – Se necesita de un largo período para el arranque – Pobre capacidad de reacción con cargas de gas pesado

Continuación Cuadro 4.2. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de reactor de lecho fijo

	– Adaptación flexible del gas a la carga	– Su diseño tiende a ser muy alto
Descendente	– Baja sensibilidad al polvo y contenido de alquitrán en el combustible	– No es factible para combustibles con tamaño de partícula muy pequeño
	– Tiempo de respuesta a la carga rápido	– Muy sensible a la formación de escoria
Cruzado	– Producción de gas flexible	– Alta caída de presión

4.4.2 Reactores de lecho fluidizado

Este tipo de reactores se basan en el principio de fluidización, donde el combustible y la cama de material inerte se comportan como un fluido, esto mejora la transferencia de calor entre las partículas. Además, tienen la posibilidad de operar a condiciones isotérmicas, la temperatura del reactor va a depender, también, del punto de fusión del material inerte que se esté utilizando, aproximadamente entre 800 °C-900 °C. Lo anterior y el tiempo de residencia corto hace que en este tipo de reactores no se pueda alcanzar el equilibrio químico. Algunas de sus características se enlistan a continuación (Sansaniwal, Pal, Rosen, & Tyagi, 2017):

- Flexibilidad en la carga y el combustible
- Altas razones de transferencia de calor
- Requerimientos moderados de agente gasificante
- Uniformidad de temperatura a lo largo de todo el reactor
- Alta eficiencia del gas en frío

Los gasificadores fluidizados pueden operar en condiciones casi isotérmicas. Además, son adecuados para el escalado del proceso, debido a su buen diseño y características de mezclado. Pueden ser utilizado con un amplio rango de tamaños de partícula. Sin embargo, se debe tener cuidado con el flujo de agente gasificante, dado que un exceso de éste provoca

una reducción de poder calorífico del gas a obtener (Sansaniwal, S.K, Rosen, M.A, Tyagi, S.K, 2017).

Este tipo de reactor se caracteriza por su buena transferencia de masa y calor y la uniformidad de la temperatura, sin embargo, el uso de biomasa es un reto dado a que ésta tiene una naturaleza muy variable, con formas y tamaños variados y baja densidad aparente. En ocasiones, se ha añadido al sistema un material inerte, como la arena, para ayudar a mejorar la fluidización de la biomasa, sin embargo, esto incrementa el contenido de ceniza en el producto, debido al desgaste del material inerte (Jia, et al., 2015).

Gasificadores de cama burbujeante

Este tipo de gasificador de lecho fluidizado es de fácil construcción y operación. Puede ser utilizado para diferentes tipos de biomasa y el proceso se da bajo una alta presión con un medio como aire, oxígeno o vapor como gasificante. Por lo general, funcionan a bajas velocidades de flujo gaseoso (alrededor de 1 m/s). Las partículas sólidas son separadas utilizando un ciclón y se recolectan en el fondo del reactor. Comparado contra los gasificadores de cama circulante, la eficiencia de conversión de carbono es menor, esto debido a la aglomeración que puede formar el combustible, lo que reduce el área de contacto entre partículas (Sansaniwal, Pal, Rosen, & Tyagi, 2017). En la Figura 4.7 se observa un esquema de un gasificador de este tipo, donde en la parte superior se encuentra el ciclón para la separación de las partículas sólidas de cenizas.

Gasificadores de cama circulante

Los gasificadores de cama circulante son adecuados cuando se utiliza biomasa como combustible dado que tienen largos tiempos de residencia para los gases. Normalmente, este tipo está comprendido por un tubo de subida o *riser* (éste funciona como el gasificador), un ciclón y un dispositivo para reciclar el sólido (Basu, 2010). En estos reactores, la velocidad del flujo de gases es mayor, y varía entre 3 m/s y 10 m/s. Asimismo, éste tiene una eficiencia de conversión de carbono mayor que los burbujeantes, sin embargo, también presenta

problemas de alquitranes (Sansaniwal, Pal, Rosen, & Tyagi, 2017). En la Figura 4.7 se observa un esquema de un gasificador de lecho circulante.

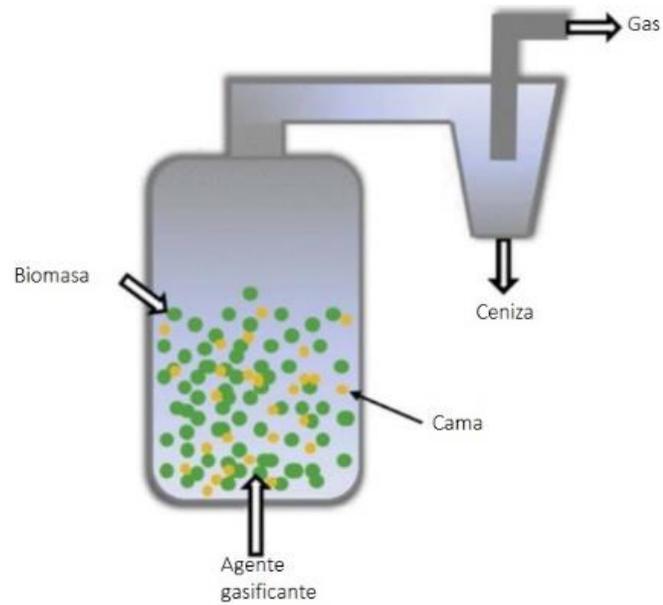


Figura 4.6. Diagrama de un gasificador de lecho burbujeante (Luque, Lin, Wilson, & Clark, 2016)

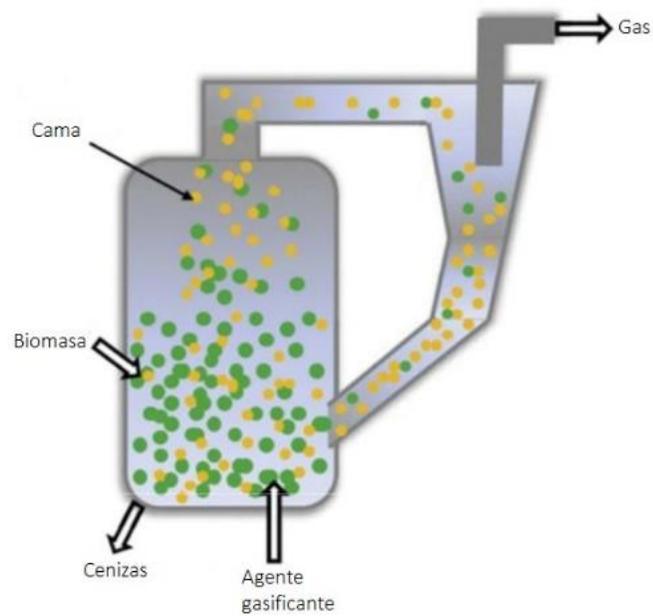


Figura 4.7. Diagrama de un gasificador de cama circulante (Luque, Lin, Wilson, & Clark, 2016)

4.4.3 Chemical Reactor Engineering Centre (CREC) RISER Simulator

El CREC RISER Simulator es un equipo cuyo diseño y patente pertenece al profesor Hugo de Lasa, de la Universidad de Western Ontario, en London, Ontario, Canadá. Éste consiste en un aparato utilizado para estudiar el desempeño de catalizadores en una reacción catalítica con fase gaseosa (US Patente nº 5102628, 1992). Consiste de dos zonas: inferior y superior, las cuales brindan fácil acceso para cargar y descargar el catalizador (o eventualmente la biomasa). El compartimento donde se coloca el catalizador y/o la biomasa (conocido como *gasket*) cuenta con dos grillas, las cuales restringen el movimiento sólo dentro de la cámara; es decir, el catalizador o la biomasa estarán retenidos en esa pequeña cámara de aproximadamente 50 cm³. Asimismo, en la parte superior, se encuentra un agitador, el cual permite la fluidización del material. El RISER cuenta con otros accesorios, una cámara de vacío, válvulas de 4 y 6 puertos, un temporizador, dos transductores de presión y cuatro controladores de presión. El temporizador está conectado a un actuador que opera la válvula de 4 puertos, lo cual se utiliza para el tiempo de reacción. Luego de la reacción, los productos son transferidos a la cámara de vacío (*vacuum box*), la cual es un cilindro de acero inoxidable con un volumen aproximado de 1 000 cm³. Cuando la válvula de 6 puertos se encuentra en la posición de “cargar,” se estará cargando el *loop* para luego transferir esa muestra al cromatógrafo de gases, el cual está equipado con dos columnas, una capilar y otra empacada, para el TCD y el FID, respectivamente, donde el TCD es el detector de conductividad térmica y el FID, el de llama iónica. Los sensores de presión se encuentran tanto en el reactor como en la cámara de vacío, y éstos tienen un máximo de presión de 50 psia y con esto se tiene un *software* de adquisición de datos de presión al cual se le puede variar la frecuencia de toma de datos. En el caso de los controladores de temperatura, se tiene uno en el reactor (superior e inferior), la cámara de vacío y la línea de transferencia; en el caso de los dos últimos, éstos se mantienen a una temperatura determinada. Sin embargo, el reactor sí se debe calentar y enfriar constantemente, para lo cual se puede poner un *set point* o se puede hacer una rampa de temperatura, lo cual dependerá del estudio que se desee realizar (Rostom, 2018). En la Figura 4.8 se muestra un esquema del CREC RISER

Simulator, donde se puede observar el funcionamiento de las válvulas de 4 y 6 puertos y su conexión en línea con el cromatógrafo de gases, y en la Figura 4.9, se tiene un acercamiento al reactor, donde se muestra el agitador, el reactor inferior y superior, las grillas y el patrón de mezcla del gas.

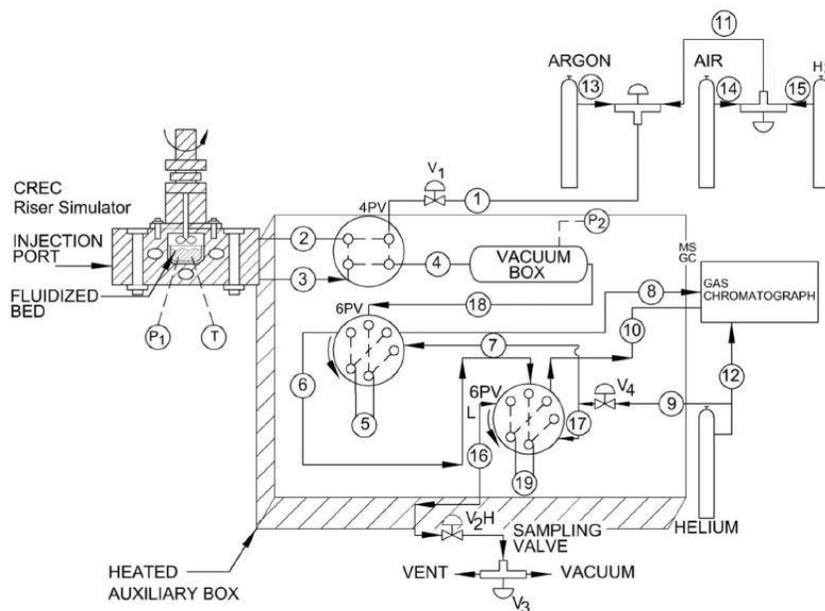


Figura 4.8. Diagrama del CREC RISER Simulator (Mazumder & deLasa, 2018)

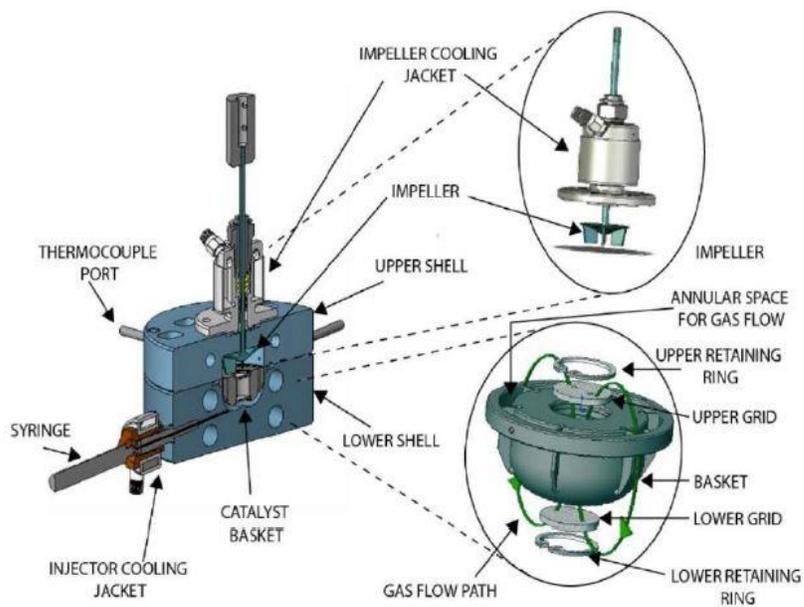


Figura 4.9. Acercamiento del reactor del CREC RISER Simulator (Kuhn, 2018)

4.5 PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE GASIFICACIÓN

4.5.1 *Temperatura*

En el caso de la temperatura, se tienen estudios que indican que, a temperaturas de 600 °C a 800 °C, la formación de alquitranes (pesados) y *char* decrece, mientras que el rendimiento de hidrógeno y monóxido de carbono aumenta. Sin embargo, hay algunos estudios donde el comportamiento con la temperatura varía dependiendo de la biomasa que se esté utilizando, por ejemplo, en el caso del bambú es contrario, al aumentar la temperatura, disminuye el rendimiento de H₂ y CO (Ahmad, Zawawi, Kasim, Inayat, & Khasri, 2016). Un comportamiento de aumento en el rendimiento de los compuestos mencionados se puede observar también con la broza de café, la corteza de árbol y el Canmet (Kuhn, Torres, Mazumder, & de Lasa, 2018).

4.5.2 *Agente gasificante*

El agente que se utiliza para llevar a cabo la gasificación influye en el producto final: su composición, por tanto, su poder calorífico. Si se usa aire, se tendrá un *syngas* diluido, debido a la presencia del nitrógeno, el gas producido se puede utilizar para motores de combustión interna, pero para otros usos como la síntesis de metanol, la calidad no es adecuada. Si se utiliza vapor de agua u oxígeno, se aumenta la proporción de hidrógeno en el gas producido; lo que permite hacer síntesis de metanol, sin embargo, se debe tomar en consideración el costo económico que implican utilizar oxígeno en lugar de aire (IDAE, 2007).

4.5.3 *Relación vapor/biomasa (SBR)*

Como su nombre lo indica, este parámetro es la relación entre la cantidad de vapor introducido al sistema y la cantidad de biomasa. Un aumento en éste se espera que derive en una mayor cantidad de hidrógeno y menor cantidad de monóxido de carbono debido a la reacción 1.5 (*WSR*). El valor máximo que se puede utilizar está limitado por la estequiometría. Como se sabe, el proceso de gasificación necesita agentes externos, debido a que es endotérmico, por lo que algunos autores hay utilizado una mezcla de vapor-oxígeno para suministrar la energía necesario para que se dé la reacción (Mazumder, Steam Gasification

of Biomass Surrogates: Catalyst Development and Kinetic Modelling (PhD Thesis), 2014). En un estudio realizado con “granos de destilería,” los cuales son un subproducto no fermentable de la destilación de etanol, con el aumento de SBR se obtuvo un incremento en la producción de metano, no así en la producción de hidrógeno. (Kumar, Eskridge, Jones, & Hanna, 2009).

4.5.4 *Radio equivalente (ER)*

El radio equivalente es otro de los parámetros a tomar en cuenta en el proceso de gasificación. Éste consiste en una medida de la cantidad de oxígeno o aire que se suple al gasificador. Es una relación entre el oxígeno y/o aire que se suple realmente y el oxígeno y/o aire necesario estequiométricamente. En gasificación, este valor está en el rango de 0.10 a 0.30, sin embargo, se tiene que, al aumentarlo, dentro del rango indicado y al incrementar la temperatura, se produce más dióxido de carbono. Se debe encontrar un valor óptimo de este parámetro, ya que, un ER muy pequeño a bajas temperaturas, desfavorece la gasificación, mientras que un ER muy alto, consume más hidrógeno y otros gases a través de reacciones de oxidación (Gungor, 2009).

5 CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA

El objetivo principal de este trabajo consistió en evaluar el potencial de gasificación térmica del rastrojo de piña, lo cual se llevó a cabo en un reactor de lecho fluidizado, el *CREC RISER Simulator*. Este proyecto consistió en tres secciones principales, las cuales se explican a continuación.

5.1 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL RASTROJO DE PIÑA

El rastrojo de piña fue donado por la empresa piñera Upala Agrícola S.A. Las plantas que se utilizaron estaban recién cosechadas, no habían sido trituradas con ningún tipo de maquinaria y no habían sido tratadas con ningún tipo de desecante. Es importante destacar que Upala Agrícola no utiliza ningún químico de este tipo. Debido a las características fibrosas de las plantas de piña, éstas se cortaron y se congelaron a $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, para facilitar la reducción de tamaño, siguiendo experimentación previa del Comité Asesor. Después de congelarla, se licuó para lograr exponer la fibra de la planta y seguidamente se utilizó una prensa manual para poder extraer una parte del agua presente, lo anterior se realizó en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica. Luego de ser prensada se volvió a congelar para así evitar la degradación de la fibra.

Adicionalmente, este líquido obtenido del prensado del rastrojo de piña fue sometido a un análisis de aguas en el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), donde se llevaron a cabo las siguientes pruebas: demanda química de oxígeno (BQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), pH, sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos totales. Los métodos utilizados para cada una de estas determinaciones se muestran en el Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Métodos utilizados para los análisis realizados en el CICA

Análisis	Método utilizado
DBO	MAQA-10
DQO	MAQA-12
pH	MAQA-24

Continuación Cuadro 5.1. Métodos utilizados para los análisis realizados en el CICA

Sólidos disueltos totales	MAQA-16
Sólidos suspendidos totales	MAQA-17

Seguidamente, se llevó a cabo el proceso de secado, el cual se realizó en el Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA). Se evaluaron tres temperaturas y tres tiempos de secado distintos, lo cual se muestra en el **Cuadro 5.2**. Con lo que se determinó que la temperatura óptima de secado es 55 °C.

Cuadro 5.2. Condiciones de secado evaluadas

Condición	Temperatura /(°C)	Tiempo /(h)
1	103	16
2	70	18
3	55	20

Una muestra húmeda, es decir, sin ser sometida al proceso de secado, fue analizada en el Centro de Investigaciones en Nutrición Animal (CINA) para la determinación de carbohidratos estructurales: celulosa, hemicelulosa y lignina. Los análisis realizados en este centro fueron: materia seca, fibra detergente ácida, fibra detergente neutro y lignina. Luego, se utilizó la metodología de Font (2013) para el cálculo de la composición de celulosa y hemicelulosa y seguidamente este valor fue normalizado. Los métodos utilizados para cada uno de los análisis realizados en el CINA se encuentran en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3. Métodos utilizados para cada uno de los análisis realizados en el CINA

Análisis	Método utilizado
Materia seca	NFTA 2.1.4
Fibra detergente ácida	AOAC 2002.04
Fibra detergente neutra	AOAC 973.18
Lignina detergente ácida	AOAC 973.18

Una muestra seca se utilizó para el análisis último, el cual se realizó en la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, utilizando el equipo *vario EL* cube. Con esta información, se determinó la fórmula y peso molecular aproximados del rastrojo de piña.

Dentro de la caracterización de la biomasa, se tiene el análisis próximo, el cual incluye el carbono fijo, las cenizas y la materia volátil. Para estas determinaciones se siguió siguieron

las normas ASTM correspondientes, las cuales se enumeran en el Cuadro 5.4. Esto se llevó a cabo en el Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química (CELEQ).

Cuadro 5.4. Normas ASTM utilizadas para el análisis próximo

Análisis	Norma ASTM utilizada
Cenizas	E1755
Humedad	E1757
Materia volátil	E872-82

Una vez determinado el porcentaje de ceniza, la muestra se sometió a un barrido semi-cuantitativo de rayos X por fluorescencia, utilizando el método de *EQUA-Oxides*. Al igual que el análisis próximo. Este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Hidrocarburos del CELEQ.

En el Cuadro 5.5 se presenta un resumen de los Centros de Investigación donde se realizó cada análisis y el método utilizado.

Cuadro 5.5. Resumen de los métodos utilizados para cada uno de los análisis realizados para la caracterización del rastrojo de piña

Análisis	Observaciones	Centro de Investigación	Método utilizado
Análisis último	CHNOS	Escuela de Ingeniería Forestal-Instituto Tecnológico de Costa Rica	Cromatografía de gases con detector TCD
Análisis próximo	Cenizas Humedad Materia volátil	CELEQ	ASTM-E1755 ASTM-E872-82 ASTM E
Análisis de aguas	DBO BQO pH Sólidos disueltos totales Sólidos suspendidos totales	CICA	MAQA-10 MAQA-12 MAQA-24 MAQA-16 MAQA-17
Análisis de carbohidratos estructurales	Materia seca FDA FDN LDA	CINA	NAFTA 2.1.4 AOAC 2002.04 AOAC 973.18 AOAC 973.18
Análisis de cenizas		CELEQ	EQUA-Oxides

Los equipos utilizados para la realización de los análisis antes mencionados se encuentran en el Cuadro 5.6.

Cuadro 5.6. Equipo utilizado para preparación del rastrojo de piña

Equipo	Fabricante	Placa UCR
Prensa	<i>AC Precision</i>	385958
Balanza granataria	<i>Romanas AZOCAR</i>	353529
Balanza analítica	<i>Adventurer SL</i>	262591
Estufa	<i>Memmert</i>	258445
Horno	<i>Lindberg</i>	217266

Las corridas experimentales se realizaron en el *Chemical Reactor Engineering Centre* de la Universidad de Western Ontario, Canadá. La muestra seca se molió utilizando un molino de granos de café. Seguidamente, se realizó el tamizado de ésta, para lo cual se usaron los tamices de 500, 300, 106 y 53 μm . Debido a las condiciones operacionales del *RISER Simulator* la sección escogida para los experimentos fue la que se encontraba entre los 106 y 53 μm , donde no se puede utilizar menos de 53 μm , dado que la biomasa podría pasar a través de las grillas, y dañar las válvulas y las líneas. No se escogió un tamaño de partícula mayor, debido al volumen del reactor, el cual es solamente de 50 mL.

5.2 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GASIFICACIÓN DEL RASTROJO DE PIÑA

Para la evaluación del potencial de gasificación del rastrojo de piña, se realizó el estudio de tres factores, para lo que se desarrolló un diseño experimental 2^3 con una repetición, para un total de 16 corridas experimentales. Los factores estudiados fueron la temperatura, el agente gasificante y la relación de vapor/biomasa.

Las hipótesis bajo las cuales se desarrolló el diseño experimental se muestran en las ecuaciones de 5.1 a 5.7 y la ecuación del modelo general para un diseño estadístico experimental 2^3 se muestra en 5.8

$$H_0: \text{Efecto del agente gasificante} = 0 \quad 5.1$$

$$H_A: \text{Efecto del agente gasificante} \neq 0$$

$$H_0: \text{Efecto de la temperatura} = 0 \quad 5.2$$

$$H_A: \text{Efecto de la temperatura} \neq 0$$

$$H_0: \text{Efecto del } S/B = 0 \quad 5.3$$

$$\begin{aligned}
& H_A: \text{Efecto del S/B} \neq 0 \\
& H_0: \text{Agente gasificante} \times \text{Temperatura} = 0 & 5.4 \\
& H_A: \text{Agente gasificante} \times \text{Temperatura} \neq 0 \\
& H_0: \text{Agente gasificante} \times \text{S/B} = 0 & 5.5 \\
& H_A: \text{Agente gasificante} \times \text{S/B} \neq 0 \\
& H_0: \text{S/B} \times \text{Temperatura} = 0 & 5.6 \\
& H_A: \text{S/B} \times \text{Temperatura} \neq 0 \\
& H_0: \text{Agente gasificante} \times \text{S/B} \times \text{Temperatura} = 0 & 5.7 \\
& H_A: \text{Agente gasificante} \times \text{S/B} \times \text{Temperatura} \neq 0 \\
& Y_{ijkl} = \mu + E_{A,i} + E_{B,j} + E_{C,k} + I_{AB,ij} + I_{Ac,ik} + I_{BC,jk} + I_{ABC,ijk} + \varepsilon_{ijkl} & 5.8 \\
& i=1, 2, \dots, a; j= 1, 2, \dots, b; k= 1, 2, \dots, c; l= 1, 2, \dots, n
\end{aligned}$$

donde,

μ : media general

E : efecto de un factor

I : interacción entre dos o más factores

ε : error aleatorio

Las variables de respuesta corresponden a la cantidad de gas producido (hidrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono) y la cantidad de *biochar* obtenido. El análisis estadístico se llevó a cabo bajo el algoritmo matemático expuesto por Box, Hunter & Hunter (2005).

Para la selección de los niveles de cada uno de los factores estudiados se tomó en cuenta tanto las limitaciones operacionales del *CREC RISER Simulator* y los resultados obtenidos de la caracterización de la biomasa. En el caso de la relación de vapor/biomasa, se tenía una limitación operacional debido a los sensores de presión del equipo cuyo valor máximo era 50 psia, por lo que la cantidad de agua presente en el sistema no podía ser superior a 8 μL , por lo que se debió tomar en cuenta la cantidad de agua ligada a la biomasa para determinar la cantidad que se podía inyectar sin sobrepasar dicho límite. Asimismo, la temperatura se seleccionó basándose en la composición de las cenizas de rastrojo, debido al alto contenido de dióxido de silicio y óxido de potasio, ésta no debe superar los 650 °C. En el Cuadro 5.7, se muestran los niveles utilizados para el desarrollo del diseño experimental.

Cuadro 5.7. Factores y niveles utilizados en el diseño experimental

Factor	Nivel	
	Bajo	Alto
Agente gasificante	H ₂ O	H ₂ O/CO ₂
Temperatura (°C)	550	600
Relación vapor-biomasa	0.2	0.4

Además, los diseños experimentales se realizan bajo tres supuestos: normalidad, varianza constante y aleatoriedad. Por consiguiente, las corridas experimentales se realizaron de manera aleatoria, como se muestra en el Cuadro 5.8.

Cuadro 5.8. Orden de corridas del diseño experimental

Orden de corrida	Agente gasificante	Temperatura (°C)	Relación vapor-biomasa (S/B)
1	H ₂ O	550	0.2
2	H ₂ O	600	0.4
3	H ₂ O	550	0.2
4	H ₂ O/CO ₂	600	0.2
5	H ₂ O/CO ₂	600	0.4
6	H ₂ O	550	0.4
7	H ₂ O	600	0.2
8	H ₂ O	600	0.2
9	H ₂ O	600	0.4
10	H ₂ O	550	0.4
11	H ₂ O/CO ₂	550	0.2
12	H ₂ O/CO ₂	600	0.4
13	H ₂ O/CO ₂	550	0.2
14	H ₂ O/CO ₂	550	0.4
15	H ₂ O/CO ₂	600	0.2
16	H ₂ O/CO ₂	550	0.4

Para llevar a cabo las corridas experimentales, se pesó inicialmente la cantidad de biomasa requerida, según el nivel, esto se colocó dentro del reactor. Seguidamente se pesó la cantidad de agua y se inyectó sobre la biomasa, esto se puede observar en la Figura 5.1. Seguidamente, se colocó en el *CREC RISER Simulator* y se realizó la prueba de fugas; en este punto era aceptable que la presión en el reactor cayera 0.01 psi/10 s. Se llevó el reactor a una presión cercana a la atmosférica (aproximadamente 14 psi para London, Ontario); siendo está la presión inicial del experimento. Se utilizó una rampa de temperatura desde la

temperatura ambiente hasta la de reacción (550 °C o 600 °C, según el nivel), la cual tenía una duración 30 min. Debido al tipo de controlador instalado, sólo se debía colocar el *set point* de temperatura y el tiempo en el que se quería alcanzar la misma. Una vez que se alcanzaba la temperatura, se mantuvo durante 10 min para un tiempo total de reacción de 40 min.



Figura 5.1. Colocación del rastrojo de piña en el reactor

Tanto la presión del reactor como la de la cámara de vacío se registraron automáticamente con el *software Personal DaqView Plus*, con una frecuencia de 1 Hz. La temperatura se anotó manualmente cada 3 min ya que no se contaba con algún *software* que lo hiciera de forma automática.

El gas generado se transfirió al cromatógrafo de gases en línea; el sistema de válvulas y tuberías se muestra en la Figura 5.2. Este *syngas* fue analizado utilizando una columna capilar y un detector de conductividad térmica, TCD y una columna empacada con un detector de flama ionizada, FID. En los Cuadro 5.9 y Cuadro 5.10 se muestran las condiciones de cada detector y columna.

Cuadro 5.9. Condiciones del GC para el caso del TCD

Condición	Valor
Temperatura (°C)	250
Presión (psi)	46.2
Flujo (mL/min)	25.0
Flujo de <i>makeup</i> gas (mL/min)	8.0
Gas de arrastre	He
Temperatura inicial de la columna (°C)	35
Temperatura final de la columna (°C)	250

Cuadro 5.10. Condiciones del método del GC para el FID

Condición	Valor
Temperatura (°C)	250
Presión (psi)	18.6
Flujo total (mL/min)	12.5
Flujo de <i>makeup</i> gas (mL/min)	5.0
Flujo de hidrógeno (mL/min)	40.0
Flujo de aire (mL/min)	400
Gas de arrastre	He
Temperatura inicial de la columna (°C)	35
Temperatura final de la columna (°C)	250

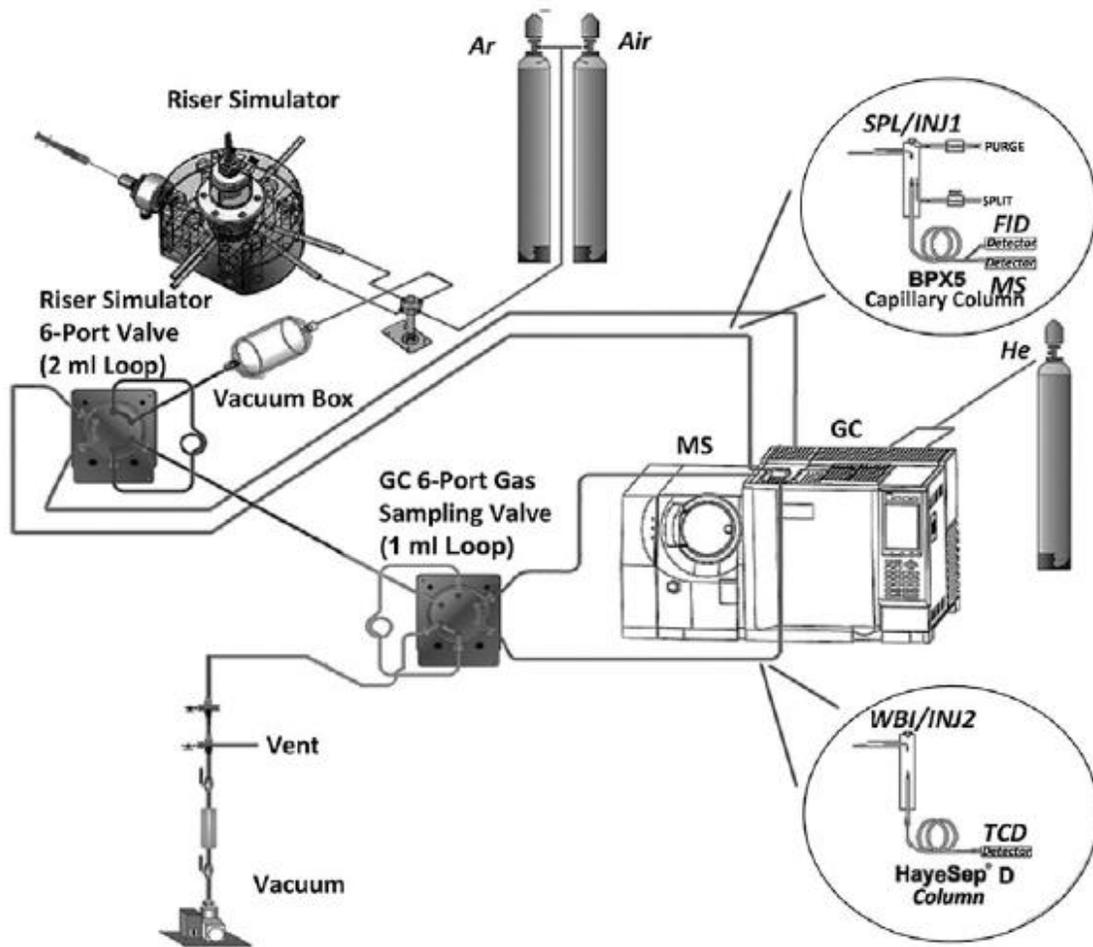


Figura 5.2. Esquema de las tuberías del CREC RISER Simulator para muestreo en línea en el GC (Kuhn, Torres, Mazumder, & de Lasa, 2018)

Para determinar la cantidad de carbono presente en el *biochar* obtenido se realizó la prueba de carbono orgánico total (*TOC*, por sus siglas en inglés). De la muestra recolectada después de la reacción, se tomaron dos fracciones, las cuales se colocaron en botes de cerámica, los cuales se pueden observar en la Figura 5.3; para luego ser introducidos, uno a uno al equipo, el *TOC-V Shimadzu*. Las condiciones bajo las cuales se dio este análisis fueron una temperatura de 900 °C y un flujo de oxígeno puro. Al finalizar cada experimento, se obtuvo la masa final de la muestra, lo que correspondió a la masa de dióxido de carbono; manteniéndose una relación molar de 1:1 con el carbono.



Figura 5.3. Muestras de biochar para TOC en botes de cerámica

Basándose en los resultados obtenidos a partir del diseño experimental, se realizó la escogencia una serie de condiciones para realizar las corridas de validación de reproducibilidad. Esto se realizó bajo la prueba de hipótesis que se muestran en 5.9 y 5.10.

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad 5.9$$

$$H_A: \mu \neq \mu_0 \quad 5.10$$

donde,

μ : valor promedio de cada variable

μ_0 : valor calculado a partir del modelo estadístico obtenido del diseño experimental

Sumado a la realización de esa prueba de hipótesis, se calculó el coeficiente de variación, CV, el cual indica el interés de la desviación estándar en relación con el promedio aritmético (Gómez M. , 2014).

Al igual que en el diseño experimental, el *biochar* obtenido de las corridas de validación fue sometido al análisis *TOC* y adicionalmente, a un análisis de área superficial, *BET*, el cual también se realizó en el *Chemical Reactor Engineering Centre*, con el fin de estudiar el posible aprovechamiento de este residuo en etapas posteriores. Las condiciones utilizadas para éste se enlistan en el Cuadro 5.11.

Cuadro 5.11. Condiciones utilizadas para el análisis de área superficial

Condición	Valor
Masa de la muestra /(g)	0,010
Adsorbente	Nitrógeno
Baño /(K)	77,35
Corrección térmica	No
Espacios libres fríos /(cm ³)	89,2692

Los equipos para la selección del tamaño de partícula, la reacción, el análisis *TOC* y el *BET* se enlistan en el Cuadro 5.12.

Cuadro 5.12. Equipos utilizados en el *CREC (UWO)*

Equipo	Fabricante
RISER Simulator	<i>RECAT Technologies</i>
Cromatógrafo de gases (GC-2010)	<i>Shimadzu</i>
Tamices	<i>VWR</i>
Estufa	<i>ThermoLyne</i>
Balanza	<i>Sartorius</i>
BET	<i>Micrometics</i>
TOC-V CPH	<i>Shimadzu</i>

Para la evaluación del potencial de gasificación se tomaron en cuenta las siguientes variables, las cuales se registran en el Cuadro 5.13.

Cuadro 5.13. Variables involucradas en el proceso para la evaluación del potencial de gasificación

Variables	
Variables fijas	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de agua en el sistema • Tiempo de reacción

Continuación Cuadro 5.13. Variables involucradas en el proceso para la evaluación del potencial de gasificación

Factores de estudio	<ul style="list-style-type: none">• Temperatura de reacción
Variables de respuesta	<ul style="list-style-type: none">• Agente gasificante• Relación de vapor de agua/biomasa• Masa del gas producido
Parámetros	<ul style="list-style-type: none">• Cantidad de <i>biochar</i>• Presión atmosférica• Temperatura ambiente

5.3 EVALUACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO: UPALA AGRÍCOLA

En esta última etapa del proyecto, se realizaron visitas de campo a Upala Agrícola durante la cual se llevaron a cabo entrevistas a diferentes personas, como Luis Vásquez, encargado del Departamento de Comunicación y Krisanto Koschny, encargado de la Sección de Preparación de terreno. Asimismo, se intercambiaron correos para la obtención de información sobre aspectos como producción de la empresa, con José Roberto Herrera de la Sección de Servicios Técnicos. Además, durante la visita de campo se realizó un resumen fotográfico de la actividad.

Sumado a lo anterior, se utilizaron los valores obtenidos en la sección experimental (descrita en el 5.2) con la información brindada por el diferente personal de Upala Agrícola para plantear un posible escenario de gasificación utilizando el rastrojo de piña.

6 CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL RASTROJO DE PIÑA

Las plantas de piña fueron sometidas a varios tratamientos para la reducción de tamaño, y el contenido de agua. Considerando el gran tamaño de las plantas, este paso es vital para poder utilizarlas en gasificación.

A diferencia de la pulpa de café, el rastrojo de piña es un material vegetal sumamente fibroso de gran tamaño; esto tiene implicaciones en el pretratamiento al cual se debe someter. La pulpa de café, en investigaciones previas, fue sometida a un proceso de prensado, secado y densificado (Torres, Molina, Urvina, Castillo, & Chaves, 2016). Por su parte, el rastrojo de piña fue sometido a un pretratamiento distinto, debido a que es un material mucho más fibroso y rígido.

En la operación de licuado se estima una pérdida del 1 % correspondiente a material que se quedaba en las aspas y paredes de la licuadora. Inicialmente se tenían 10 bolsas plásticas con 1.2 kg de rastrojo cortado (en promedio); éstas se encontraban en su máxima capacidad. Luego de la operación de licuado, la cantidad de rastrojo era alrededor de 6.6 kg, lo que implica una reducción de prácticamente un 50 %. Además, luego de licuar el rastrojo, la cantidad de bolsas disminuyó a 8, sin embargo, éstas estaban entre un 50 % y 75 % de su capacidad.

En la Figura 6.1 (a) se muestra el rastrojo de piña luego de ser cortado y congelado. Se puede observar que, aún la fibra no se encuentra expuesta y que tiene todavía un tamaño de partícula que no es adecuado para un reactor de lecho fluidizado. Mientras en que la Figura 6.1 (b) se muestra el rastrojo luego de ser licuado; de esta forma se logró exponer la fibra.



a)



b)

Figura 6.1. a) Rastrojo cortado y congelado b) Rastrojo licuado

La siguiente etapa del pretratamiento fue el prensado. Se tenía una masa inicial aproximadamente de 6.6 kg y luego se obtuvo una masa alrededor de 5.6 kg, por lo que hubo una reducción de 15 % y la cantidad de bolsas se redujo a 5, las cuales se encontraban a un 75 % de su capacidad. En la Figura 6.2 (a) se muestra el rastrojo prensado y se puede observar que éste es más denso. Por su parte, en la Figura 6.2 (b) se tiene el líquido obtenido de la operación de prensado. La cantidad de éste fue aproximadamente 0.9 kg. Sin embargo, se observa que tiene cierta cantidad de sólido; esto debido al sistema de recolección del mismo. Cabe resaltar, que se puede estimar que la operación de prensado se tuvo pérdidas alrededor del 5 % que se quedaban en las paredes del equipo y debido a su funcionamiento, la extracción de la biomasa prensada se debía realizar de forma manual.

Después de realizar estas etapas de pretratamiento, la reducción de la masa de rastrojo de piña fue aproximadamente, 53 %. Esto es de suma importancia para considerar en investigaciones posteriores para la toma de decisión con respecto al almacenamiento del rastrojo de piña.



a)



b)

Figura 6.2. a) Rastrojo prensado b) Líquido obtenido del prensado

El paso posterior en el pretratamiento fue el secado, que como se explicó en el Capítulo 5, este se realizó a 3 temperaturas y 3 tiempos distintos. En la Figura 6.3 (a) se observa el rastrojo secado a una temperatura de 103 °C, la cual no fue una temperatura adecuada, ya que el secado no se dio uniformemente, donde una parte de la biomasa se quemó, posiblemente por la presencia de azúcares. En la Figura 6.3 (b) se tiene una fotografía del resultado obtenido del secado a 70 °C. La cantidad de biomasa quemada disminuyó considerablemente en comparación con los 103 °C, sin embargo, en este caso el secado tampoco se dio uniformemente. Por su parte, en la Figura 6.3 (c) se muestra la biomasa secada a 55 °C, la cual muestra que el secado se dio de una mejor manera que a las otras dos temperaturas. Incluso, se puede observar la diferencia de colores que presentan, ya que, a 55 °C el rastrojo tiene un color verdoso, sin zonas oscuras que indiquen que éste se pudo haber quemado. En esta etapa del pretratamiento sólo se desea la extracción del agua contenida en las fibras de rastrojo, sin embargo, el color oscuro en las fibras secadas a 103 °C y 70 °C es un indicio que, a esas temperaturas, no sólo se está secando el rastrojo, sino que existen zonas que están sufriendo cambios químicos.

Además, este estudio permite saber que, para el caso de una aplicación industrial, la temperatura de secado no debe superar los 55 °C.

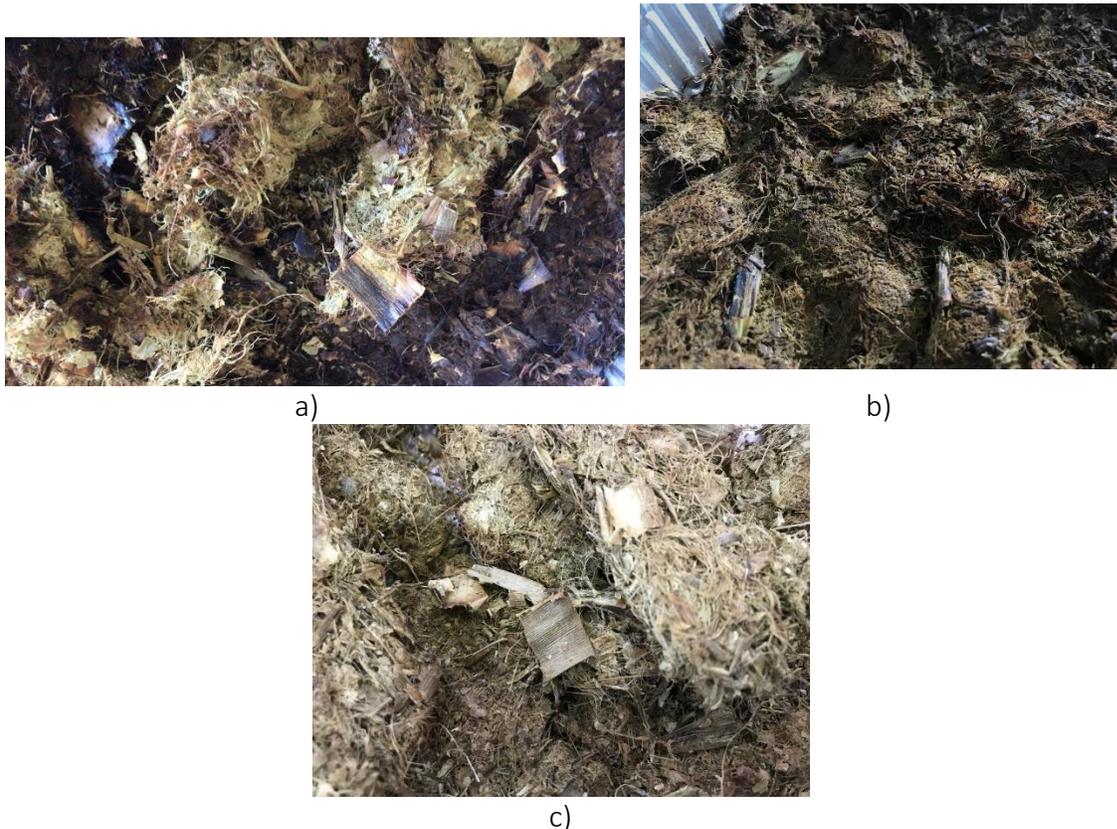


Figura 6.3. a) Rastrojo de piña secado a 103 °C b) Rastrojo de piña secado a 70 °C
c) Rastrojo de piña secado a 55 °C

Como se mencionó en el Capítulo 5, uno de los análisis realizados, fue el de carbohidratos estructurales, resultados normalizados que se muestran en el Cuadro 6.1. Estos valores no son comparables con los reportados por Amador (Cuadro 3.3), dado que no se reporta el valor de la lignina. Sin embargo, se puede comparar contra los datos del Cuadro 3.2, tanto la planta entera, el rastrojo y la corona muestran la misma tendencia, donde el carbohidrato en mayor presencia es la celulosa y en menor proporción, la lignina. Sin embargo, los porcentajes obtenidos en este análisis son mayores a los reportados; además, cabe destacar que los resultados mostrados en el Cuadro 6.1, se encuentran normalizados, mientras que los del Cuadro 3.2 y 3.3 no se indica si fueron normalizados.

Cuadro 6.1. Composición de carbohidratos estructurales del rastrojo de piña

Carbohidrato estructural	Composición / (%)
Hemicelulosa	37.6
Celulosa	57.5

Continuación Cuadro 6.1. Composición de carbohidratos estructurales del rastrojo de piña

Lignina

4.9

Con la composición de carbohidratos estructurales, se construyó un diagrama ternario, el cual se muestra en la Figura 6.4. Además, se incluyeron los resultados presentados por Gómez (2018) para broza de café de tres zonas geográficas distintas y chips de madera, lo cual ayuda para hacer una comparación. Vassilev (2015) clasifica la biomasa en 6 tipos diferentes (CLH, LCH, LHC, HLC, HCL, CHL), como se observa en la Figura 6.4. El rastrojo de piña se clasifica como CHL, lo que significa que la celulosa es la que se encuentra en mayor proporción, seguido de hemicelulosa y por último lignina. En investigaciones anteriores, se estudió la broza de café de tres zonas geográficas distintas y se obtuvo que la clasificación de la misma es HCL, mientras que los chips de madera son del tipo CLH. El rastrojo de piña, al ser biomasa de tipo CHL, se caracteriza por un aumento en reactividad, cristalinidad, volatilidad, azúcares y materia inorgánica, al mismo tiempo hay una reducción en el calor específico, aromaticidad, densidad y el rendimiento de *char* (Vassilev, Vassileva, & Vassilev, 2015).

Asimismo, es importante destacar, que la lignina debido a su estructura tan compleja es un precursor de alquitrans tipo PAH (hidrocarburos poliaromáticos complejos), siendo éstos un inconveniente en el proceso de gasificación, dado que puede causar problemas operacionales, como condensación en los puntos fríos de las tuberías. Por lo que, al tener un bajo porcentaje de lignina, se reduce la presencia de ese tipo de alquitrans.

Seguidamente, en el Cuadro 6.2, se muestra el resultado del análisis elemental. A partir de estos valores, se calcularon fracciones molares y se normalizaron con respecto al carbono con lo que se aproximó la fórmula empírica del rastrojo de piña como $CH_{1.8}O_{0.8}$ y se estima el peso molecular en 26.96 g/mol. La relación molar del nitrógeno y del azufre con el carbono es de 0.03 y 0.002, respectivamente, por lo que no se toman en cuenta para la fórmula empírica.

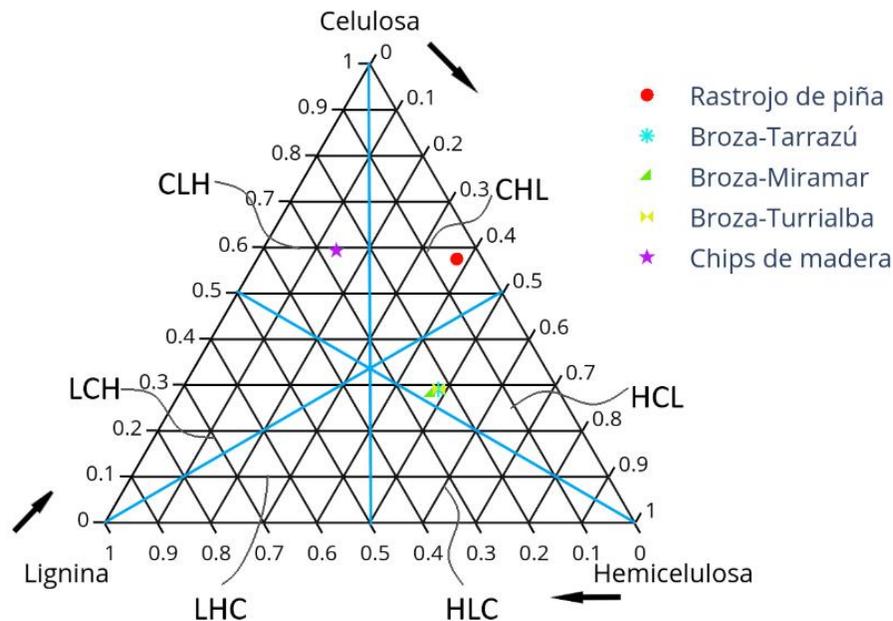


Figura 6.4. Diagrama ternario de carbohidratos estructurales de algunas biomásas

Cuadro 6.2. Análisis último para el rastrojo de piña

Elemento	Composición / (%m/m)
Carbono	40.7 ± 0,9
Hidrógeno	6.2 ± 0,2
Nitrógeno	1.6 ± 0,02
Azufre	0.25 ± 0,08
Oxígeno	23 ± 1
Cenizas	6.7 ± 0,1

Las cenizas obtenidas fueron sometidas a un análisis de rayos X por fluorescencia (XRF) y el resultado obtenido se muestra en el Cuadro 6.3. Sin embargo, hay varios óxidos que no se muestran en el Cuadro 6.3, dado que su porcentaje es menor al 0.1 %, siendo éstos NiO, CuO, ZnO, SrO, PbO, V₂O₅ y ZrO₂.

Se puede ver que los minerales de mayor composición son SiO₂ y K₂O, con porcentajes mayores al 20 %. Se tiene otros como CaO, Fe₂O₃ y SO₃ con porcentajes alrededor del 10 %. La presencia de diferentes metales en la ceniza ayuda a un mejor entendimiento de potenciales problemas en la operación del sistema. Por ejemplo, altos porcentajes de

metales alcalinos, como el óxido de potasio, pueden bajar el punto de fusión del dióxido de silicio, generando problemas de atascamiento. Asimismo, este análisis XRF permite establecer condiciones operacionales del sistema de gasificación, como lo es la temperatura de operación, la cual no debe superar los 650 °C para evitar, principalmente, los problemas de atascamiento.



Figura 6.5. Cenizas obtenidas del rastrojo de piña

Cuadro 6.3. Composición promedio y la desviación estándar de las cenizas de rastrojo de piña obtenidas por medio de análisis XRF

Compuesto	Composición promedio \pm desviación estándar/ (%m/m)
Na ₂ O	1.0 \pm 0.3
MgO	3.4 \pm 0.5
Al ₂ O ₃	6.2 \pm 0.2
SiO ₂	26.8 \pm 0.9
P ₂ O ₅	3.1 \pm 0.4
SO ₃	7.4 \pm 0.3
Cl	3.0 \pm 0.1
K ₂ O	26.3 \pm 0.4
CaO	10.2 \pm 0.4
TiO ₂	1.9 \pm 0.2
Cr ₂ O ₃	0.14 \pm 0.04

Continuación Cuadro 6.3. Resultados del XRF de las cenizas de rastrojo de piña

MnO	0.36 ± 0.01
Fe ₂ O ₃	10.09 ± 0.02

En la Figura 6.6 se muestra el diagrama ternario a partir del análisis XRF de las cenizas de rastrojo de piña. De acuerdo con la clasificación de Vassiljev, Vassileva & Vassilev (2015), la ceniza de rastrojo de piña se encuentra en la sección de acidez media y además, se caracteriza por poseer una temperatura de fusión de ceniza menor a 1 200 °C, lo que limita condiciones operacionales, como la temperatura. Por esta razón, las temperaturas estudiadas en el diseño experimental fueron 550 °C y 600 °C.

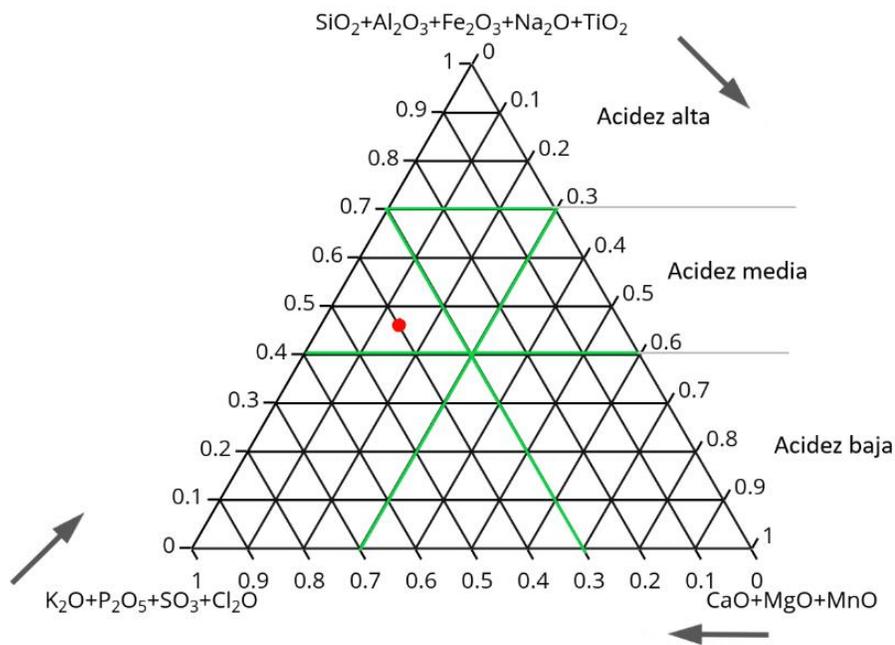


Figura 6.6. Diagrama ternario del análisis de cenizas de rastrojo de piña

Otro aspecto importante dentro de la caracterización de biomasa es el análisis próximo. Los resultados de éste para el caso de rastrojo de piña se encuentran en el Cuadro 6.4. Por su parte, en la Figura 6.7 se muestra el diagrama ternario para el caso del análisis próximo de rastrojo de piña y los valores obtenidos de broza de café y chips de madera reportados por Gómez (2018). Se puede observar en ese diagrama ternario que tanto el rastrojo de piña como la broza de café y los chips de madera se ubican en la misma zona del gráfico, donde

el porcentaje más alto corresponde a la materia volátil, siendo éste el porcentaje de la biomasa “disponible” para el proceso termoquímico en estudio, donde se da un paso de un estado sólido a gaseoso para formar productos de interés. Por su parte, el carbono fijo, en un porcentaje menor al 10 %, indica el contenido de carbono que no es aprovechable porque está en forma de carbonatos.

Cuadro 6.4. Análisis próximo del rastrojo de piña

Parámetro	Valor / (%m/m)
Materia volátil	84.2
Cenizas	6.7
Carbono fijo	9.1

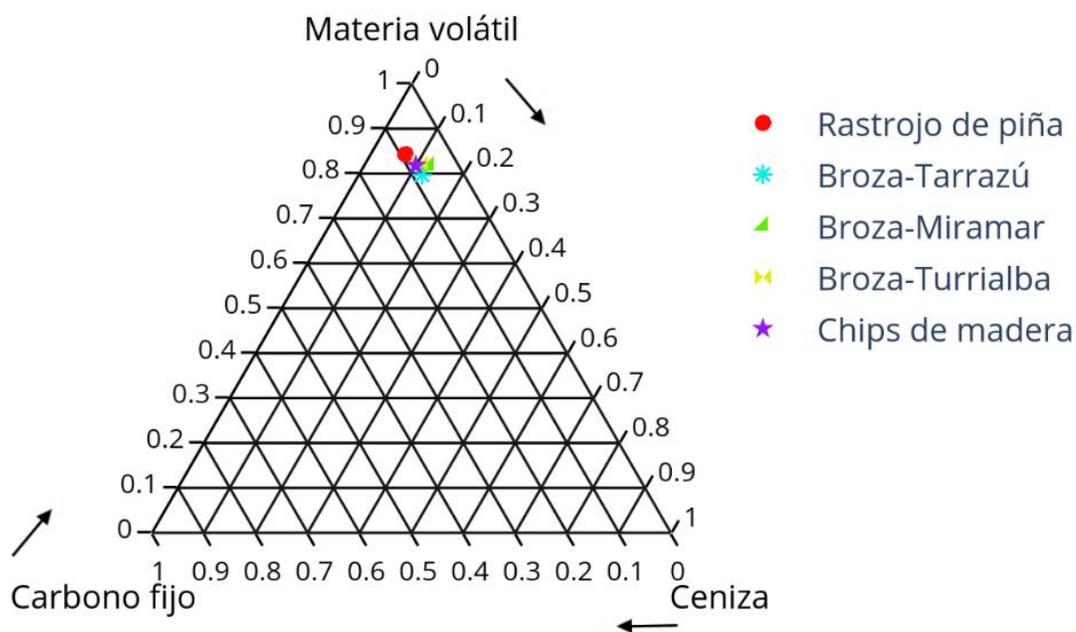


Figura 6.7. Diagrama ternario del análisis próximo de algunas biomazas

Los resultados del análisis de aguas se muestran en el Cuadro 6.5. En caso que, se quisiera disponer el líquido de prensado, sin darle algún uso posterior al prensado debe cumplir con lo estipulado en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N° 33601-MINAE-S (2007), cuyos valores máximos permisibles se muestran en el Cuadro 6.6. Al comparar los resultados obtenidos, el líquido de prensado no puede ser vertido a un cuerpo receptor ni al alcantarillado sanitario, dado que el parámetro de pH está fuera del rango, es menor al

permitido. Para poder disponer de éste, se debe elevar el pH hasta lograr que esté dentro de los parámetros permitidos, ya sea que se quiera verter a un cuerpo receptor o al alcantarillado sanitario, para lo cual se debe agregar una base.

No obstante, no se puede afirmar que luego de un tratamiento para controlar el pH este líquido pueda ser vertido al alcantarillado o a un cuerpo receptor, dado que no se tienen valores de SAAM (sustancias activas al azul de metileno) ni grasas y para que un agua se pueda disponer de alguna de las dos maneras se debe cumplir con todos los parámetros del Reglamento.

Cuadro 6.5. Análisis de aguas del líquido de prensado

Parámetro	Valor
DBO	49.6
DQO	72.7
pH	4.07
Sólidos disueltos totales	32.91
Sólidos suspendidos totales	8.11

Cuadro 6.6. Límites máximos permisibles para vertido de aguas en alcantarillados sanitarios o en un cuerpo receptor (*Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N33601, 2010*)

Parámetro	Límite máximo	
	Alcantarillado	Cuerpo receptor
DBO (mg/L)	300	50
DQO (mg/L)	750	150
Sólidos suspendidos (mg/L)	300	150
Sólidos sedimentables (mL/L)	5	1
pH	6-9	5-9

Sin embargo, de acuerdo con los conceptos de economía circular, se busca convertir bienes al final de su vida útil en materias primas o recursos para otros, minimizando el desperdicio y siguiendo métodos sostenibles (Valavanidis, 2018). Es decir, se busca que todo lo obtenido en un proceso pueda ser aprovechable. Por tanto, otra posibilidad de revalorización del agua del prensado es la producción de biogás. En próximos estudios, se debería realizar la prueba de sólidos volátiles para luego obtener la relación SV/ST (sólidos volátiles/sólidos totales),

dado que este es un parámetro de la cantidad de materia orgánica que puede ser convertida en metano (González, Pérez, Wong, Bello, & Yañez, 2015).

El tamaño de partícula utilizado estuvo restringido por aspectos operacionales, por lo que se utilizó la fracción retenida entre los tamices 106 μm y 53 μm , dado que al utilizar menos de 53 μm , partículas sólidas podrían atravesar las grillas del reactor provocando problemas en las tuberías y las válvulas. Asimismo, el volumen disponible en el reactor es de 50 mL, por lo que fue otro factor que influyó en el tamaño a utilizar. El tamaño de partícula no era un factor que se estuviese estudiando en este proyecto. Sin embargo, en futuras investigaciones se podría tomar en cuenta como uno de los factores a estudiar para observar si éste tiene un efecto significativo sobre el gas que se produce.

Durante el proceso de molienda, el rastrojo se separó en dos fases. La primera era menos densa y tenía un aspecto más fibroso, como se muestra en la Figura 6.8 (a). La segunda fase era más densa, por lo que se asentó en el fondo del molino y era un tamaño de partícula menor que la primera fase, lo que se observa en la Figura 6.8 (b). Por su parte en la Figura 6.8 (c), se tiene la muestra de rastrojo tamizada a utilizar durante la sección experimental. En investigaciones posteriores se podría estudiar el aprovechamiento de la fase menos densa, ya que ésta comprende alrededor de un 60 % del rastrojo de piña molido. Asimismo, se podría estudiar el uso de otra de las fracciones del tamizado, dado que en los tamices de mayor tamaño se tenía una fracción considerable de biomasa, en especial en el primer tamiz (500 μm) con aproximadamente un 30 % del rastrojo tamizado. Mientras que, sólo alrededor del 15 %- 20 % de lo tamizado se encontró en el tamaño de partícula utilizado.



a)



c)



d)

Figura 6.8. a) Fase menos densa obtenida de la molienda de rastrojo de piña b) Fase densa de rastrojo de piña obtenida de la molienda c) Rastrojo tamizado entre 106 μm y 53 μm

6.2 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE GASIFICACIÓN DEL RASTROJO DE PIÑA

6.2.1 Análisis estadístico

Para llevar a cabo el estudio del potencial de gasificación del rastrojo de piña, se realizó un diseño de experimentos (*DOE* por sus siglas en inglés), como se explicó anteriormente en el Capítulo 5.

Para la selección de los niveles del *DOE*, las temperaturas de operación fueron seleccionadas basándose en los resultados del análisis de metales (sección 6.1), dado que la temperatura no puede superar los 650 °C, se escogió 550 °C y 600 °C.

Las variables de respuesta corresponden a la cantidad del gas producido, tomando en cuenta el hidrógeno, monóxido de carbono, metano y dióxido de carbono, y *biochar*. La cantidad promedio, con su respectiva desviación estándar, de cada especie se muestra Cuadro 6.7. Además, es importante mencionar que los resultados se encuentran en base seca, dado que por medio de la cromatografía de gases no se logra cuantificar la cantidad de agua presente en un sistema.

Cuadro 6.7. Cantidad promedio y su correspondiente desviación estándar obtenida de cada especie en cada una de las corridas experimentales

Orden de corrida estándar	Cantidad producida de cada especie $\times 10^{-3}$ /(mol)			
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
1	0.18 ± 0.05	0.25 ± 0.02	0.222 ± 0.005	0.558 ± 0.007
2	0.23 ± 0.06	0.20 ± 0.04	0.18 ± 0.02	1.49 ± 0.06
3	0.23 ± 0.04	0.202 ± 0.002	0.27 ± 0.03	0.55 ± 0.03
4	0.3 ± 0.1	0.17 ± 0.03	0.28 ± 0.03	1.4 ± 0.1
5	0.17 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.16 ± 0.01	0.45 ± 0.02
6	0.1152 ± 0.00004	0.046 ± 0.002	0.07 ± 0.01	1.53 ± 0.04
7	0.199 ± 0.005	0.129 ± 0.001	0.206 ± 0.001	0.43 ± 0.05
8	0.18 ± 0.04	0.11 ± 0.02	0.188 ± 0.003	1.3 ± 0.2

El análisis del diseño experimental se realizó para los cuatro gases de interés (hidrógeno, metano, monóxido de carbono y dióxido de carbono) y para la cantidad de *biochar* obtenido (normalizado por gramo de rastrojo). En el Cuadro 6.8 se muestran los efectos e interacciones significativas para cada uno de los gases estudiados. Asimismo, la significancia de los efectos e interacciones se observa mediante los gráficos de efectos estandarizados,

en la Figura 6.9 se muestra el caso del monóxido de carbono (para los gráficos para hidrógeno, metano, dióxido de carbono y *biochar* se muestran en los Anexos), donde la línea señalada de color rojo corresponde al valor de la *t-student* para un valor de nivel de significancia de 5 % y 8 grados de libertad. Con esto, se determinaron cuáles de los factores estudiados y sus interacciones son significativos.

Cuadro 6.8. Efectos e interacciones significativas para cada caso estudiado

Variable de respuesta	Significativo
Hidrógeno	B, C, AC
Metano	A, B, C, AB
Monóxido de carbono	A, C, AB, BC
Dióxido de carbono	A, B
<i>biochar</i> /Gastrojo de piña	C

*A: agente gasificante B: temperatura C: relación S/B

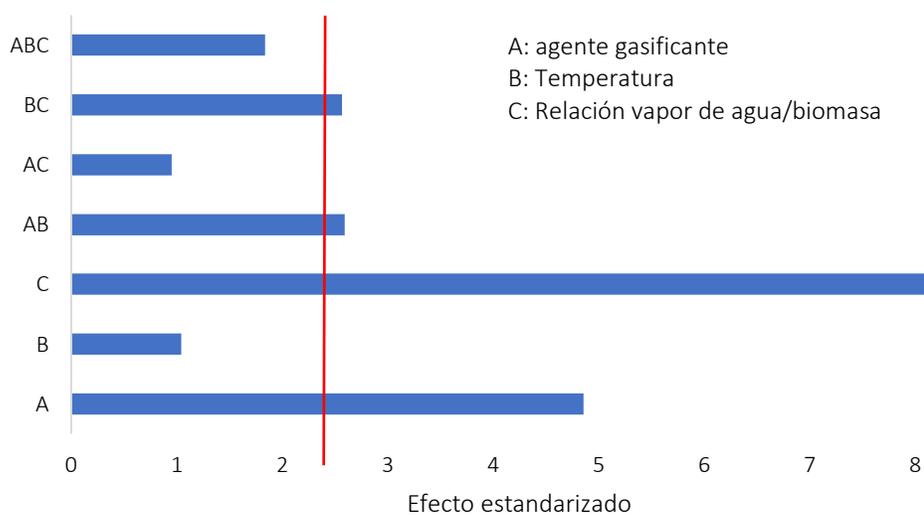


Figura 6.9. Gráfico de efectos estandarizados para metano

A: agente gasificante B: temperatura C: Relación S/B

El siguiente paso es la determinación del nivel en el cual se debe trabajar cada uno de los factores dependiendo de lo que se busque en el experimento. Por ejemplo, para un *syngas* de categoría baja y media contiene principalmente hidrógeno y monóxido de carbono (en el caso del de baja categoría hay presencia de nitrógeno), mientras que en el de alta categoría el predominante es el metano. Sin embargo, el de alta sólo se consigue con operaciones posteriores a la gasificación. Con lo anterior, se busca altas concentraciones de hidrógeno,

metano y monóxido de carbono, no así del dióxido de carbono. Para esta toma de decisiones se realizaron los análisis de interacción, en las Figura 6.10 y Figura 6.11 se muestran los que corresponden al monóxido de carbono. En el Cuadro 6.9 se resumen los niveles que se deberían trabajar dependiendo de cuál gas se desea potenciar, así deberá ser la combinación de factores a utilizar.

Cuadro 6.9. Nivel de cada factor que debe ser utilizado

Variable	Agente gasificante (A)	Temperatura (B)	Relación vapor/biomasa (C)
Hidrógeno	Alto	Alto	Bajo
Metano	Bajo	Alto	Bajo
Monóxido de carbono	Bajo	Bajo	Bajo
Dióxido de carbono	Bajo	Alto	NA

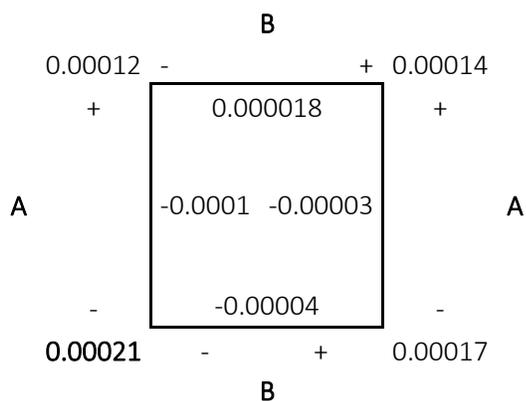


Figura 6.10. Análisis de interacción AB para el monóxido de carbono

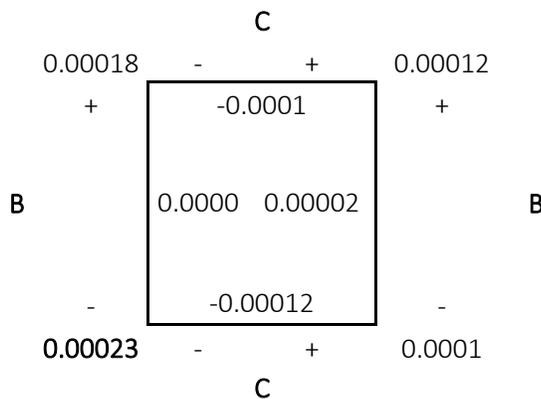


Figura 6.11. Análisis de la interacción BC para el monóxido de carbono

Luego del análisis de los efectos e interacciones significativos, se determinó el modelo para cada una de las variables estudiadas para la determinación de los valores predichos, los cuales se muestran en el Cuadro 6.10.

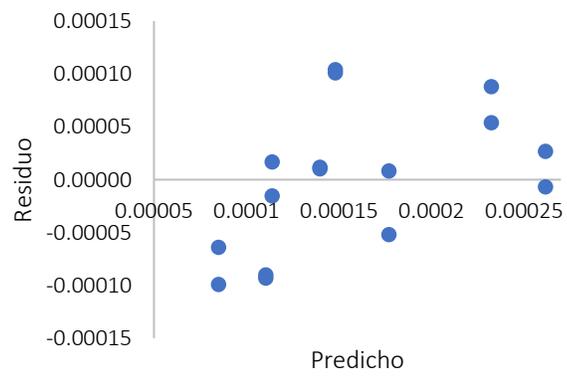
Los valores predichos fueron utilizados para la verificación de los supuestos bajo los cuales se desarrolla un diseño de experimentos, siendo éstos aleatoriedad, varianza constante y normalidad. Los residuos fueron calculados a partir del modelo para cada una de las variables y los valores experimentalmente obtenidos. Dicha verificación se realizó por medio del método gráfico y los resultados obtenidos para monóxido de carbono se muestran en la Figura 6.12, donde se observa que no hay patrones, por tanto, se cumplen los supuestos de aleatoriedad y de varianza constante; los gráficos de verificación correspondientes a hidrógeno, dióxido de carbono, metano y *biochar* se muestran en los Anexos. Asimismo, se observa que, en el caso de la normalidad, los residuos se distribuyen a lo largo de la recta, por lo que éste también se cumple. Luego de verificar que los tres supuestos se cumplen, se puede afirmar que el diseño experimental tiene validez.

Cuadro 6.10. Modelo obtenido para cada una de las variables según efectos e interacciones significativos

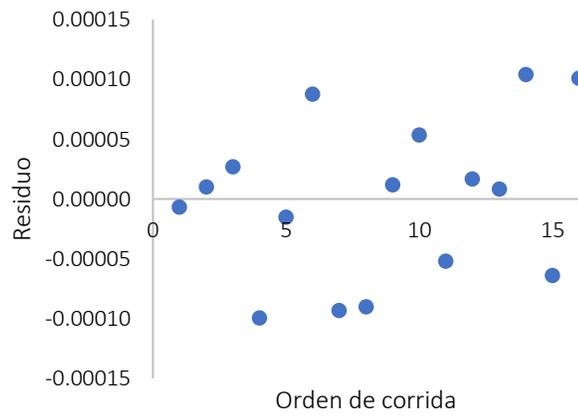
Variable	Modelo	
Hidrógeno	$Y = Y_{\text{PROM}} + E_{\text{B}}X_{\text{B}} + E_{\text{C}}X_{\text{C}} + I_{\text{AC}}X_{\text{AC}}$	6.1
Metano	$Y = Y_{\text{PROM}} + E_{\text{A}}X_{\text{A}} + E_{\text{B}}X_{\text{B}} + E_{\text{C}}X_{\text{C}} + I_{\text{AB}}X_{\text{AB}}$	6.2
Monóxido de carbono	$Y = Y_{\text{PROM}} + E_{\text{A}}X_{\text{A}} + E_{\text{C}}X_{\text{C}} + I_{\text{AB}}X_{\text{AB}} + I_{\text{BC}}X_{\text{BC}}$	6.3
Dióxido de carbono	$Y = Y_{\text{PROM}} + E_{\text{A}}X_{\text{A}} + E_{\text{B}}X_{\text{B}}$	6.4
Cantidad de biochar ($g_{\text{biochar}}/g_{\text{rastrajo}}$)	$Y = Y_{\text{PROM}} + E_{\text{C}}X_{\text{C}}$	6.5

*E: efecto I: Interacción

A)



B)



C)

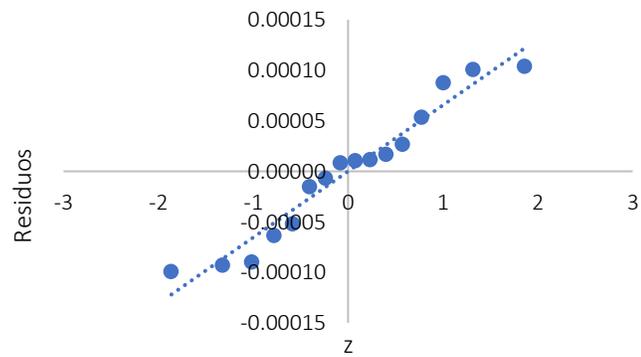


Figura 6.12. Verificación de supuestos para el caso del monóxido de carbono A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad

6.2.2 *Análisis de los productos de la gasificación de rastrojo de piña en el CREC RISER Simulator*

Los productos principales obtenidos de un proceso de gasificación son el hidrógeno, el metano, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono, sin embargo, también se forman algunos otros, como etano y los alquitranes, los cuales se desean minimizar, ya que alta presencia de alquitranes baja la eficiencia del proceso.

Cabe resaltar que, los resultados se presentan en una base seca, debido a que no se logra cuantificar la cantidad de agua presente, debido que las moléculas de agua pueden ser adsorbidas y desorbidas de la columna y no es un comportamiento que se pueda predecir, por lo que la cantidad de agua que se muestra en un cromatograma varía de una corrida a otra y no es un reflejo preciso de la cantidad que se generó en la reacción.

Asimismo, es importante mencionar que en los cromatogramas se muestra un pico que corresponde al nitrógeno (aire), el cual corresponde al sellado que haya tenido el equipo durante el experimento, por lo tanto, también varía de un experimento al otro. En la Figura 6.13 se muestra el cromatograma obtenido bajo las siguientes condiciones: temperatura de 600 °C, una relación de vapor/biomasa de 0.2 y helio como coadyuvante de fluidización (vapor de agua como gasificante), donde se observa el orden en el que se obtienen los picos así como su intensidad. Con respecto a la intensidad del hidrógeno, el cual es pequeña comparada a los otros compuestos, debido a que un detector *TCD* basa su principio de funcionamiento en la conductividad térmica tanto del compuesto como del gas de arrastre utilizado. En este caso, el gas de arrastre utilizado fue el helio, el cual tiene una conductividad térmica alrededor de 0.0988 W/m °C, mientras que el hidrógeno de 0.1241 W/m °C (McCabe, Smith, & Harriot, 2007), por tanto, la diferencia entre las conductividades es 0,0253 W/m °C. Debido a esa diferencia, la identificación del hidrógeno puede tener mayor fuente de error comparado con los otros gases (CO, CO₂ y CH₄). Sin embargo, esto se mitigó controlando el tiempo de retención, el cual ha sido ampliamente estudiado según la curva de calibración disponible.

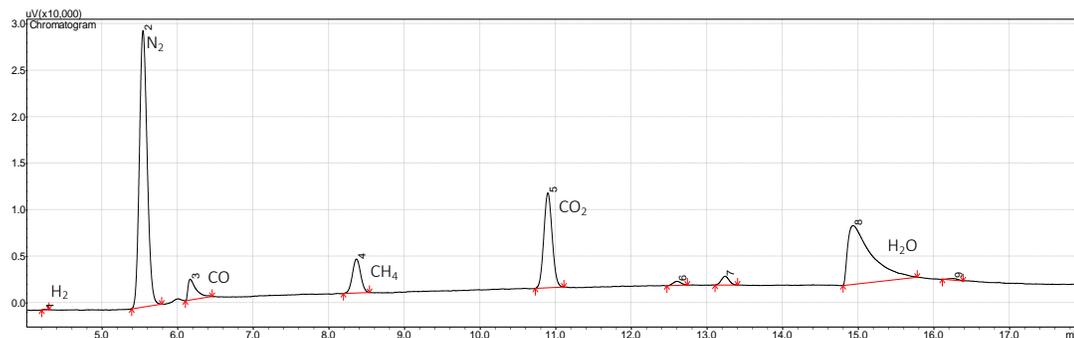


Figura 6.13. Cromatograma *TCD* para una corrida con condiciones de 600 °C, una relación de vapor/biomasa de 0.2 y agente gasificante vapor de agua

Por otra parte, el cromatograma resultante del *FID* se muestra en la Figura 6.14, en este caso el detector se utilizó para cuantificar los compuestos orgánicos. En el *FID*, los compuestos son quemados con una llama de hidrógeno/helio, que al quemarse se ionizan y estos iones se miden como una corriente. El *FID* no se configuró para cuantificar, sino que permite la identificación de compuestos clave. El primer pico corresponde al metano y el segundo a metanol. Sin embargo, para lograr esta clarificación se debe utilizar un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas (*GC-MS*), en futuras experimentaciones ya que proporciona señales útiles para la cuantificación de alquitranes.

La cuantificación del alquitrán se realizó utilizando tanto los datos obtenidos con el *TCD* como los obtenidos con el *FID*. Se realizó una relación entre resultados (*FID* y *TCD*) utilizando la señal del metano, dado que ésta es la única que se muestra en ambos cromatogramas y proporciona una relación másica entre la identidad de los diferentes picos observados en el *FID*. Existen diferentes tipos de *tar*, basándose en la literatura y las condiciones bajo las cuales se realizó el estudio, se definió que los alquitranes que se podrían obtener de este proceso de gasificación son fenol, cresol, benceno, tolueno, furfural y levoglucosano. Se realizó un promedio de las masas molares de dichos compuestos para obtener una masa molar promedio del alquitrán, lo cual es necesario para una estimación de la masa molar del gas producido.

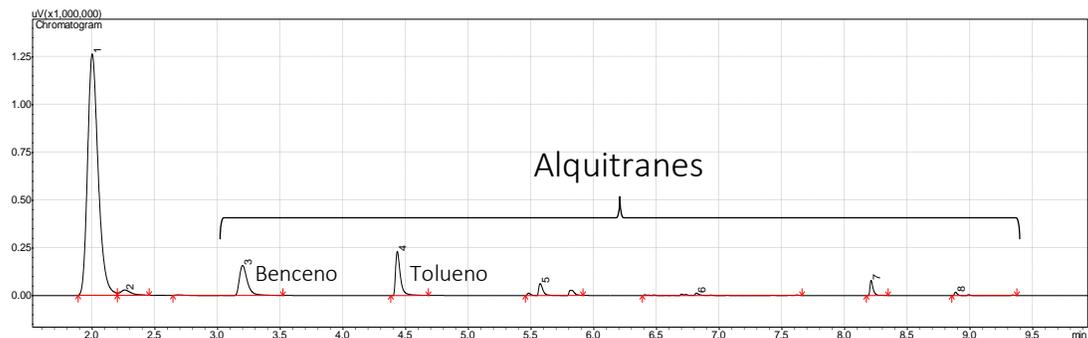


Figura 6.14. Cromatograma *FID* para una corrida con condiciones de 600 °C, una relación de vapor/biomasa de 0.2 y vapor de agua como agente gasificante

De otras investigaciones realizadas bajo el marco del proyecto “Gasificación catalítica de biomasa: desarrollo y caracterización de catalizador, modelado cinético” se ha logrado identificar cuáles son los alquitrane que se forman de un proceso de gasificación de biomasa. Entre los cuales se identificaron benceno, tolueno, xileno, fenol, *meta*-metilfenol, *orto*-metoxifenol y 2-metoxi-4-metilfenol.

En el caso de la gasificación de rastrojo de piña, las señales predominantes, que se dan cerca de los 3 min y los 4.5 min, corresponden al benceno y el tolueno, respectivamente. En el caso específico la corrida experimental representada en la Figura 6.23, el porcentaje de alquitrane corresponde al 5 %. Este porcentaje es bajo si se compara contra resultados presentados sobre gasificación de diferentes biomasa como el *Canmet* y la paja, donde éstos rondan 3l 20 % o 25 % (Kuhn, Torres, Mazumder, & de Lasa, 2018). Por lo que, al comparar estos valores, la gasificación de rastrojo de piña se ve favorecida por el bajo contenido de alquitrane, que como se explicó anteriormente, estos provocan ciertos inconvenientes en la operación de gasificación.

6.2.3 Balances de masa

Para al cálculo de los moles de gas producido, la ecuación de estado utilizada fue la del Gas Ideal, la cual se muestra en la ecuación 6.5. Esto debido a las condiciones a las que se estaba trabajando: bajas presiones y temperaturas (el experimento iniciaba a temperatura y presión ambiente y alcanzaba un máximo de 3 atm).

$$PV = nRT$$

6.5

Donde,

P : presión, psi

V : volumen, mL

n : cantidad, mol

R : Constante de los gases, psi mL/ mol K

T : temperatura, K

En la Figura 6.15 se muestra un bloque con las entradas y salidas del sistema tomadas en cuenta para el balance de carbono.

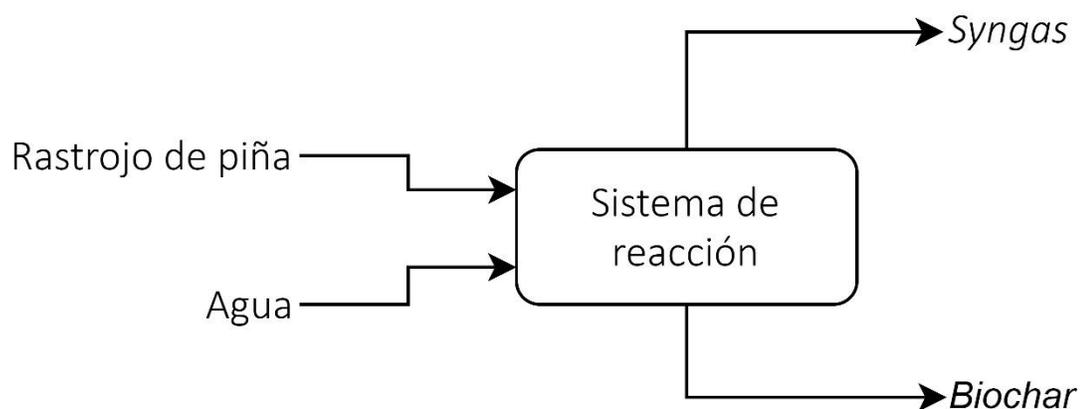


Figura 6.15. Entradas y salidas para el balance de carbono

En la Figura 6.16 se muestra el perfil de presión, tanto para el reactor como para la cámara de vacío. En el estado 1, se da el inicio de la reacción, donde todo el sistema se encuentra a presión atmosférica (alrededor de 14 psi), en este punto el reactor y la cámara de vacío están aislados; es decir, funcionan como dos compartimentos por aparte. En 2 es donde se alcanza la presión máxima en el reactor, lo cual se da a los 30 min de reacción. Seguido de eso, se alcanza un equilibrio hasta llegar al estado 4. Por su parte, el estado 3 corresponde únicamente a la *vacuum box*; en este punto la presión empieza a disminuir hasta los 3 psia. En el estado 5 se da la transferencia del gas producido del reactor a la cámara de vacío y se equilibran las presiones de ambos compartimentos.

Asimismo, se observa que el aumento en la presión tiene una tendencia similar al incremento en la temperatura, como se puede ver en la ecuación de estado utilizada, la presión y la temperatura son directamente proporcionales. Además, se observa cómo la presión empieza a aumentar desde prácticamente el minuto 1 de reacción; esto dado que se dan dos

fenómenos importantes. Inicialmente se empieza a dar la evaporación del agua del sistema para convertirse en vapor; y luego, por el tipo de reacción que se da (se puede observar en la ecuación 6.10). Hay un paso del estado sólido (la biomasa) al estado gaseoso, generando la conversión termoquímica de la biomasa a gases permanentes, como: metano, hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y un residuo sólido conocido como *biochar*, por lo que hay una considerable expansión, reflejándose en el aumento de presión. Se observa también que el tiempo de reacción establecido es adecuado, dado que, en los últimos 10 min se puede observar que el perfil de presión alcanza un valor estable, se podría decir que la cantidad de gas que se forma en ese período es poco significativa.

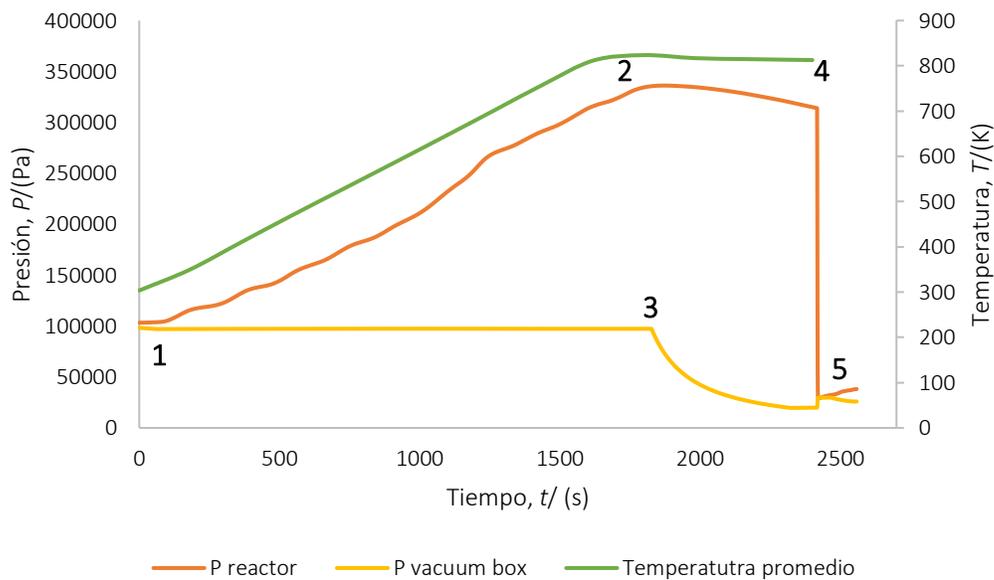


Figura 6.16. Perfil de presión de una corrida a 550 °C, con H₂O como agente gasificante y S/B de 0.2

Idealmente un balance de carbono debería ser del 100 %, sin embargo, debido a factores de error que se dan durante la experimentación; se tiene un intervalo de 80 % a 120 %. En la Figura 6.17 se muestran los límites permisibles y los valores obtenidos para cada una de las 16 corridas del diseño experimental. Se observa que la mayoría de los puntos están dentro del intervalo permitido, sin embargo, hay algunos que se encuentran fuera del rango. Esto debido a los problemas con respecto a la cuantificación del agua presente en el sistema, el

porcentaje de hidrógeno es mayor, por lo que también aumenta el peso molecular promedio estimado para el gas producido. Otro aspecto importante de mencionar es que los alquitranes que se formaron durante las reacciones se consideran despreciables dentro del balance de masa.

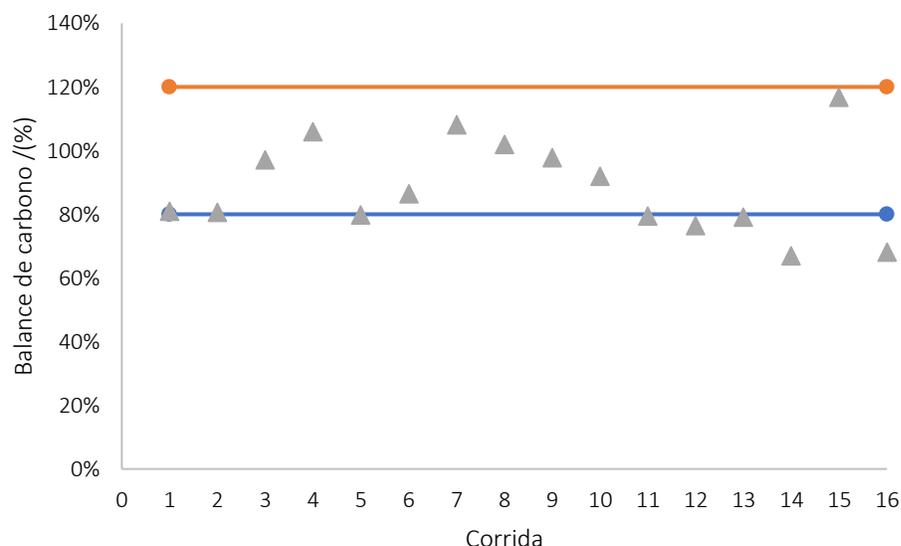
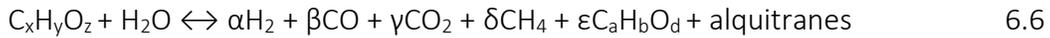


Figura 6.17. Balances de carbono para cada una de las corridas del diseño experimental y los límites máximo y mínimo permisible

Existen varias reacciones involucradas en un proceso de gasificación, donde la reacción primaria se muestra en 6.6 y las secundarias, como la de Boudouard, *water gas shift*, reformado de metano en seco, reformado de metano con vapor, entre otras. Sin embargo, en estudios anteriores, se llegó a la conclusión de que algunas pueden ser linealmente dependientes, por lo que se han definido las que son independientes y son las que se muestran en 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10. Con respecto a las reacciones 6.9 y 6.10 no se sabe a ciencia cierta cuál de las dos es la que sucede, por tanto, se toman en cuenta ambas en el sistema de reacción.

Es importante mencionar que, en la reacción principal, se muestra la formación del *biochar*, anteriormente se creía que era solamente carbono, sin embargo, estudios indican que no es así, sino que tiene una fórmula molecular $C_aH_bO_d$, diferente a la de la biomasa, el cual también puede reaccionar dentro del proceso de gasificación. Por lo tanto, en la reacción

6.10, que corresponde a Boudouard, el reactivo indicado como carbono, sería $C_aH_bO_d$ (Torres, Urvina, deLasa, 2019).



donde,

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$: coeficientes estequiométricos de la reacción 6.6

Al analizar un proceso de gasificación, se debe tener en cuenta que no sólo se da una reacción, sino que es un sistema de reacciones múltiples, como se indicó anteriormente en las ecuaciones señaladas de la 6.10 a la 6.14. Se realizaron gráficos comparativos de la composición del *syngas*, tomando en consideración solamente los 4 gases de interés, estos gráficos comparan la temperatura y el agente gasificante.

Como se indica en la literatura, lo que se busca en un *syngas* es principalmente hidrógeno, metano y monóxido de carbono, sin embargo, es inevitable tener cierta cantidad de dióxido de carbono que se forma, por lo que, en una etapa posterior a la gasificación, se podría llevar a cabo una recuperación del CO_2 que se produjo para que luego sea inyectado al reactor para utilizar como agente gasificante.

En la Figura 6.18 se observa la composición del gas producido con una relación S/B de 0.2. En este caso, la cantidad de rastrojo presente en el sistema era mayor que el gas producido de la Figura 6.19 (S/B de 0.4). Por lo tanto, la fuente de carbono era mayor (en el caso de los experimentos realizados con helio como agente gasificante), debido a esto se esperaría una mayor proporción de los gases como monóxido de carbono, metano y dióxido de carbono. Si se compara el porcentaje de dióxido de carbono se observa que las dos barras de la derecha muestran un porcentaje mayor, dado que son los experimentos que se realizaron con CO_2 como agente gasificante, lo cual deriva en un exceso en un exceso del mismo.

Al observar la serie de reacciones, se esperaría que el exceso de CO_2 desplace las reacciones 6.11 y 6.14 hacia la derecha, mientras que la reacción 6.12 lo haga hacia la izquierda, si se

analiza desde el Principio de Le Châtelier. Sin embargo, las reacciones involucradas en el sistema van en las dos direcciones, es decir, no son reacciones directas, sino que éstas llegan a un equilibrio. Por lo que un proceso de gasificación no se puede explicar solamente por ese principio, sino que es un sistema de reacción más complejo, donde intervienen alrededor de cinco reacciones, las cuales se encontrarán en algún punto en equilibrio.

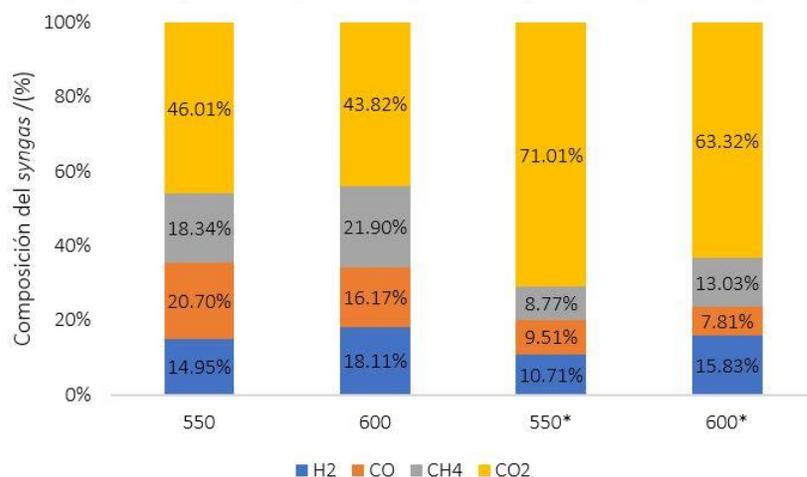


Figura 6.18. Composición del *syngas* con una relación de vapor/biomasa de 0.2
Nota: *se refiere a los experimentos realizados con CO₂ como agente gasificante

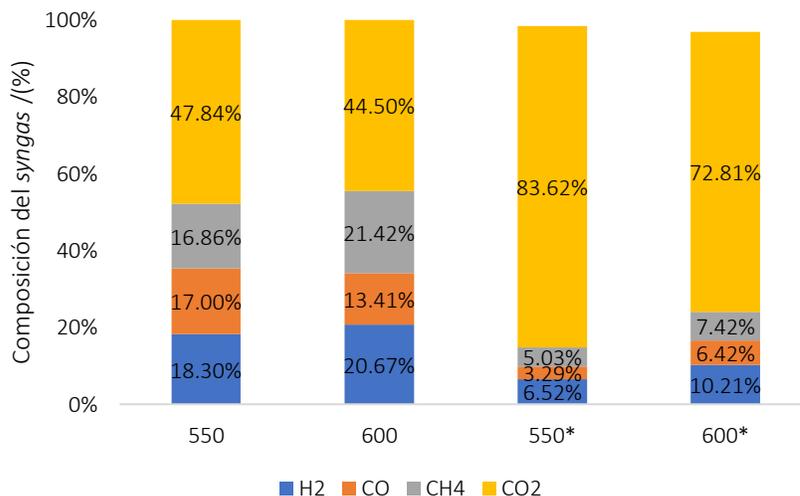


Figura 6.19. Composición del *syngas* con una relación de vapor/biomasa de 0.4
Nota: *se refiere a los experimentos realizados con CO₂ como agente gasificante

Con los resultados obtenidos, también, se puede estudiar la relación de hidrógeno/monóxido de carbono. Los valores promedio obtenidos de este parámetro, con su correspondiente

desviación estándar, se presentan en el Cuadro 6.11. Se puede observar que el valor más alto corresponde a 2,5 para corridas bajo condiciones de CO₂ como agente gasificante, 550 °C y S/B de 0.4. Los valores obtenidos para los experimentos con Canmet y paja están cercanos a lo obtenido para el rastrojo de piña. Sin embargo, cuando los experimentos se llevaron a cabo con vapor de agua como agente gasificante, en el caso del rastrojo, estos valores disminuyen a valores cercanos a 1. Sin embargo, en el caso del Canmet y la paja, se tuvo un comportamiento contrario, donde la relación H₂/CO está en un rango de 3 a 6 (Kuhn, Torres, Mazumder, & de Lasa, 2018).

En cuanto al rastrojo de piña, los dos valores más altos (2,1 y 2,5) corresponden a experimentos realizados con dióxido de carbono como agente gasificante.

Cuadro 6.11. Relación hidrógeno/monóxido de carbono promedio

Orden de corrida estándar	Relación H ₂ /CO
1	0.7 ± 0,1
2	1.2 ± 0,5
3	1.1 ± 0,2
4	2.1 ± 0,7
5	1.08 ± 0,05
6	2.5 ± 0,1
7	1.54 ± 0,05
8	1.7 ± 0,7

Como se ha mencionado anteriormente, se desean bajas cantidades de dióxido de carbono, dado que se desea un *syngas* rico en hidrógeno, monóxido de carbono y metano. Por tanto, se han normalizado los resultados de composición sin el dióxido de carbono. Esto es un escenario factible, dado que en una etapa posterior al gasificador se podría separar el CO₂ y aprovecharlo de otra manera, por ejemplo, como agente gasificante. En el Cuadro 6.12, se muestran dichos resultados normalizados, junto con resultados obtenidos para madera (astillas y pellets) y broza de café. Se puede observar que, en el caso del rastrojo de piña, la composición de los tres gases está aproximadamente alrededor del 30 %; a diferencia del caso de la madera, ya sea en astillas o pellets, y la pulpa de café, donde hay un gas

predominante que es el monóxido de carbono, con porcentajes al 50 % y el gas minoritario es el metano con porcentajes menores al 20 %.

Cuadro 6.12. Composición del *syngas* libre de CO₂ para diferentes biomásas/ (%)

Compuesto	Composición libre de CO ₂ / (%)			
	Astillas*	Pellets*	Biomasa Broza de café ⁺	Rastrojo de piña
CO	54.32%	54.41%	66.87%	36.73%
CH ₄	10.17%	19.58%	9.96%	34.89%
H ₂	35.52%	26.02%	23.18%	28.37%

* (Chaves-Flores, 2017) ⁺(Torres, Molina & Hernández, 2016)

6.2.4 Validación de la reproducibilidad del experimento

Con el objetivo de estudiar la repetibilidad del experimento, una de las corridas del diseño experimental, se realizó tres veces más como parte de la validación del diseño experimental. Las condiciones utilizadas para la validación de la reproducibilidad se fueron determinadas por el Comité Asesor priorizando la formación de monóxido de carbono; las cuales se enlistan a continuación:

- Temperatura: 550 °C
- Agente gasificante: H₂O
- Relación vapor/biomasa: 0.2

En la Figura 6.20 se observa la cantidad promedio de cada uno de los gases en estudio, para una muestra de 1 mL, con su respectiva desviación estándar y los datos se muestran en el Cuadro 6.13.

Cuadro 6.13. Cantidad promedio producida de cada uno de los gases de interés para las corridas de validación

	Cantidad promedio producida de cada gas × 10 ⁻³ /(mol)			
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
Promedio	0.19	0.25	0.24	0.64
Desviación estándar	0.03	0.02	0.01	0.01

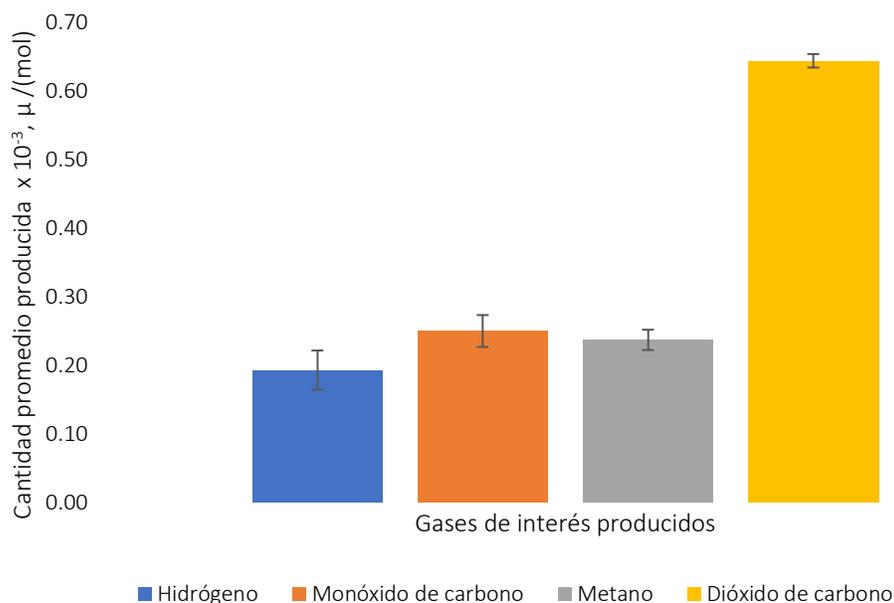


Figura 6.20. Cantidad promedio producida de cada uno de los gases de interés con su respectiva desviación estándar

A partir de la media aritmética y la desviación estándar de cada uno de los gases mencionados anteriormente, así como el balance de carbono, se calculó el coeficiente de variación, el cual se muestra en el Cuadro 6.14, se observa que la mayor variación se da con el hidrógeno, siendo éste el único coeficiente de variación superior al 10 %, lo que se puede atribuir a lo explicado anteriormente con respecto al método de cuantificación de los gases y el problema con la diferencia de conductividades térmicas del hidrógeno y el helio.

Cuadro 6.14. Coeficiente de variación para las variables de respuesta estudiadas

Parámetro	Coeficiente de variación, CV/ (%)
Balance de carbono	6.9
Hidrógeno	14.8
Monóxido de carbono	9.3
Metano	8.5
Dióxido de carbono	1.5

En el Cuadro 6.15 se muestran los valores obtenidos para la prueba de hipótesis realizada para la cantidad de monóxido de carbono obtenido. Por lo tanto, para un nivel de significancia del 5 %, se puede decir que son técnicamente equivalentes como evidencian los valores *t*. Sin embargo, se recomienda una mayor cantidad de repeticiones para que los datos

de la muestra para que sean una mejor representación de los datos poblacionales aumentando los grados de libertad y logrando un comportamiento normal.

Cuadro 6.15. Valores de decisión para la prueba de hipótesis

$t_{0,05; 2 \text{ gl}}$	t_c
4.302	4.734

Además, el *biochar* obtenido de las corridas experimentales de validación fue sometido a un análisis de BET (área superficial), con el cual se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 6.16. El experimento de área superficial se puede aproximar a varios modelos por lo que se obtienen resultados diferentes; al ser modelos, se puede calcular el coeficiente de correlación. En el caso de lo obtenido, la mayor correlación se da con el modelo *BET*.

Cuadro 6.16. Valores de área superficial para el *biochar* obtenido bajo condiciones de helio (vapor de agua como agente gasificante), S/B 0,2 y 550 °C

Modelo	Área superficial /(m ² /g)	Coefficiente de correlación
Single Point	24.8	NR*
Langmuir	63.2 ± 4.4	0.988
BET	35.4 ± 2.0	0.990

*Valor no indicado en el reporte generado

El *biochar* obtenido puede ser utilizado como fertilizante, así se le daría un valor agregado a este subproducto del proceso de gasificación. Hay estudios que muestran un efecto positivo en el crecimiento de plantas al utilizar *biochar* como fertilizante. También se podría mezclar con fertilizantes orgánicos (*compost*) lo que ha mostrado mejores resultados que la combinación de *biochar* con fertilizantes minerales (Schulz, Glaser, & Bruno, 2012).

7 CAPÍTULO 7:

CASO DE ESTUDIO: UPALA AGRÍCOLA

7.1 ANTECEDENTES DE UPALA AGRÍCOLA

En el presente estudio se realiza un análisis de Upala Agrícola, la cual es una empresa agroindustrial ubicada en Quebrada Grande de Yolillal de Upala, en la provincia de Alajuela, dedicada a producir, empacar y comercializar piña fresca. Cuenta con 2 000 ha de terreno y sus labores se dan bajo un marco que promueve la protección ambiental, prevención de riesgos laborales, apoyo a todas las partes interesadas y gestión de seguridad en la cadena de suministro de comercio internacional, para lo cual se basan en los siguientes cuatro fundamentos (Volio, 2018):

- Cumplimiento: se establecen procedimientos y programas para asegurar que las operaciones se lleven a cabo de acuerdo con la legislación actual.
- Compromiso de protección ambiental: se implementan procedimientos que permitan una agricultura sostenible, procurando optimización de recursos, mitigación del cambio climático y protección de la biodiversidad.
- Mejoramiento continuo: se cuenta con un programa de revisión periódica de las actividades con el fin de mejorar el sistema integrado de gestión, así como la verificación del personal, procesos operativos y selección de asociados al negocio.
- Comunicación: se promueve una comunicación abierta y oportuna entre los miembros y se tiene a disposición general información sobre el compromiso ambiental, entorno laboral y seguridad en el comercio.

Misión

“Ser una empresa productora, procesadora y comercializadora de piña fresca, que busca un mejoramiento continuo en sus procesos para proporcionar a nuestros clientes de un producto con los más altos estándares de calidad e inocuidad. Hacemos esto dentro de un

marco de desarrollo sostenible, apoyando a las comunidades vecinas, protegiendo al ambiente y a nuestro personal (Volio, 2018).”

Visión

“Ser una empresa con liderazgo en la producción y comercialización de piña fresca, utilizando prácticas agrícolas sostenibles y satisfaciendo los requerimientos de nuestros clientes (Volio, 2018).”

Producto y mercado

La variedad de piña producida en Upala Agrícola es la *MD2 Gold*, popularmente conocida como piña dorada o *golden*. Son producidas en tamaños que van del calibre 5 al 10 (esto depende de la cantidad de piñas en una caja, dado que las cajas tienen tamaños estándar; es decir si en una caja caben cinco piñas, éstas son calibre 5) y se pueden comercializar tanto con corona como sin ésta. Por ejemplo, en el caso de Puerto Rico se deben exportar sin corona, dado que este país tiene establecido por ley que la producción piñera está a cargo solamente del Gobierno y se exporta sin corona, dado que ésta se considera un hijo de la plantación.

La producción de piña es solamente para exportación y no para consumo nacional, el producto que no cumple con los estándares de los mercados internacionales se destina a otra empresa para producción de jugos o en su caso como alimento para ganado en la zona de la provincia de Guanacaste.

Los mercados de exportación de piña son: Estados Unidos, Canadá, Unión Europea (España, Reino Unido, Holanda, Francia, Alemania, Grecia e Italia) y otros como Turquía. Este producto es comercializado bajo varias marcas, las cuales dependen del país de destino, pero también han desarrollado *UPALA GOLD*, su propia marca, principalmente utilizada para la comercialización en Turquía, Francia y España (Volio, 2018).

Es importante destacar que el mercado de destino es quien define las características que el producto debe poseer, como los grados Brix, la coloración y el calibre. Por ejemplo, el

mercado chino prefiere la fruta amarilla, lo que sería un 4 en escala de coloración, mientras que el europeo prefiere una piña de coloración media, entre 1-2.

Para la determinación del calibre de las piñas, se tiene una cuadrilla de estimación que hace un censo de los tamaños, lo que por lo general tiene solamente un 5 % de error.

Certificaciones

Dentro de su política, Upala Agrícola está comprometida con la protección del medio ambiente, por lo cual ha trabajado a lo largo de los años para conseguir diferentes certificaciones, como lo son:

- Bandera Azul Ecológica
- GLOBALGAP
- *British Retail Consortium* (BRC)
- ISO-14001
- *Primus Labs-Harvest Crew*
- *Rainforest Allianca*

7.2 Caracterización del proceso productivo

Upala Agrícola S.A trabaja durante todo el año, donde cada día se realizan las labores de siembra, cosecha y preparación de terreno. Es importante mencionar, que el tiempo que tarda la planta en poder ser cosechada es de alrededor de un año, por tanto, la planificación de la producción es de suma importancia para una empresa que se dedica a la actividad piñera. Además, como Upala Agrícola dedica toda su producción a la exportación, se debe considerar el tiempo que toma llegar al producto desde los puertos costarricenses hasta los diversos países de destino.

El área total de Upala Agrícola es de alrededor de 2 500 ha, de las cuales 1 600 ha están dedicadas al cultivo y las restantes 900 ha incluyen la planta y las zonas de conservación. Esto porque Upala Agrícola está sumamente comprometido con la labor ambiental.

Al 2018, en promedio procesaban 12,5 ha/semana y cada una de esas hectáreas generaba un desecho (rastrojo) de alrededor de 150 t. En la actualidad, la forma que usan para disponer el rastrojo es la trituración en verde para luego ser incorporado al suelo. Aproximadamente por semana en Upala Agrícola se trituran de 1 ha a 2 ha por día.

En la Figura 7.1 se muestra el ciclo de actividades que se llevan a cabo en la actividad piñera, la cual, para el caso de estudio, se lleva a cabo de lunes a sábado.



Figura 7.1. Ciclo de trabajo relacionada a la actividad piñera

La actividad de subsulado consiste en exponer el suelo; es decir, voltear la tierra. Viene seguido por la rastra, pero esto se realiza varias veces (subsulado-rastra-subsulado-rastra-rastra-subsoladora). Al acabar con ese ciclo se continúa con el encamado, donde el espacio entre cada cama es aproximadamente 0.40 m. El camino entre bloques es 3.30 m justo el espacio necesario para la maquinaria y la mitad de un bloque tiene una distancia de 14 m. En la Figura 7.2 se muestra cómo se disponen los bloques y las camas de siembra, además se muestra una hilera de puntos, los cuales representan las plantas y la separación entre una y la otra es 0.20 m.

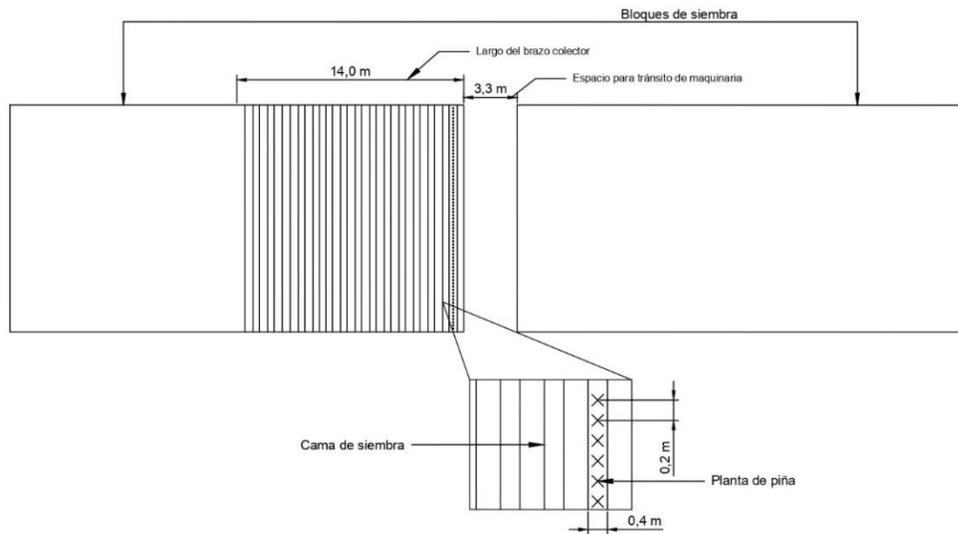


Figura 7.2. Disposición de los bloques para siembra (Elaboración propia)

La siguiente etapa es el encamado y tal como su nombre lo indica es formar las camas sobre las cuales se va a sembrar. En la Figura 7.3 se observa la maquinaria que se utiliza para llevar a cabo esta tarea; ésta realiza dos camas de 0.40 m cada una a la vez y la separación entre camas corresponde a la sección señalada en rojo en la Figura 7.3. En la Figura 7.4 se muestra el terreno preparado, luego de las labores de subsolado, rastra y encamado.



Figura 7.3. Maquinaria utilizada para la labor de encamado (Fotografía propia)



Figura 7.4. Terreno preparado luego de subsolado, rastra y encamado (Fotografía propia)

Como se expuso anteriormente, la plantación de piña no requiere irrigación, por lo que se necesita un buen sistema de drenaje para evitar que el agua de las precipitaciones se acumule en los suelos, lo que afectaría el cultivo. Por tanto, dentro de la preparación del terreno para la siembra, se tiene una etapa de drenaje, donde se colocan tubos de lado a lado del bloque (de la parte más alta a la más baja). Las aguas de un bloque se concentran en cierto punto y luego son dirigidas a cuerpos de agua como humedales y quebradas. Además, para evitar que sedimentos lleguen a dichos cuerpos receptores, cerca de los canales se realiza un hueco de mayor profundidad, a lo que se le conoce como gaveta. En la Figura 7.5 se observa uno de los canales que se hacen para el drenaje del terreno y en la Figura 7.6 se muestra la gaveta que se hace para la recolección de sedimento.



Figura 7.5. Canales para el drenaje del terreno (Fotografía propia)



Figura 7.6. Gaveta para recolección de sedimento (Fotografía propia)

La palea consiste es un trabajo que se realiza de forma manual con pala con el fin de limpiar sedimentos y las salidas de agua. Es el paso anterior a la siembra. En cuanto a la siembra, se tienen hijos de primera y de segunda, así como guías y basales. La diferencia entre los primeros es el peso que tienen y la diferencia entre los otros es la zona de la planta donde se toman; uno basal se corta cercano a donde estaba la fruta, mientras que el guía se toma más abajo. Otra diferencia entre ellos es su tipo de anclaje como se observa en la Figura 7.7, sin embargo, en cuestión de producción son iguales.

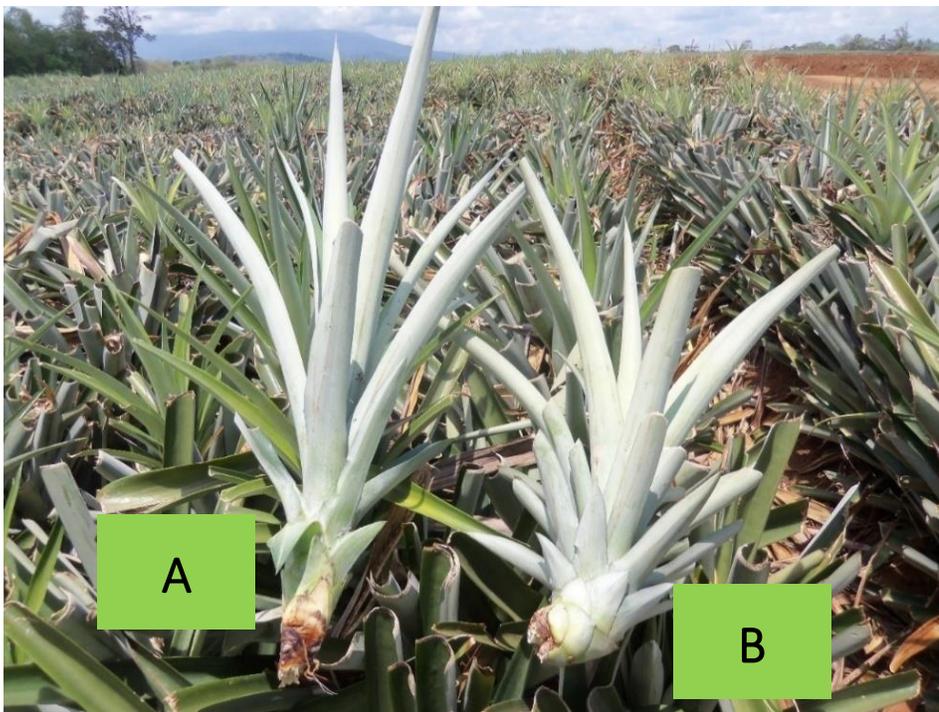


Figura 7.7. A) Hijo guía B) Hijo basal (Fotografía propia)

La siembra es una actividad manual cuya jornada está comprendida de 6 am a 12 md. En ese período se logra sembrar de 1.5 ha a 2.5 ha dependiendo de las condiciones del terreno. La herramienta que utilizan para la siembra se conoce como chuza, la cual se observa en la Figura 7.8, con esto hace un hueco en la tierra de aproximadamente 10 cm donde colocan el hijo. En la Figura 7.9 se observa un terreno que está siendo sembrado.



Figura 7.8. Herramienta utilizada para la siembra (Fotografía propia)



Figura 7.9. Terreno en proceso de siembra (Fotografía propia)

La cosecha también se realiza de forma manual. Los colaboradores van tomando la fruta y la colocan en una banda transportadora que lo coloca en las carretas para luego transportarlo

a la planta empacadora. Sin embargo, debido a la extensión de la plantación, cuando los bloques de cosecha se encuentran lejos de la planta, se transportan en camión en lugar de carreta para así evitar que la fruta se “maltrate.” En la Figura 7.10 se muestra el sistema de cosecha empleado.



Figura 7.10. Sistema de cosecha de la piña (Fotografía propia)

Control de calidad

El control de calidad se realiza tanto en campo como en laboratorio. Algunos de los factores que estudian son la dureza, los grados Brix, la acidez, la coloración (interna y externa).

Además, dentro de la planta de empaque cuentan con una cámara de simulación, la cual permite el almacenamiento de ciertos lotes bajo las mismas condiciones y el mismo tiempo de exportación, por si en caso de que, al llegar al puerto de desembarque se reciba alguna queja de disconformidad con el producto, se pueda comparar con el producto que se tiene en la cámara.

Dado que la producción de Upala Agrícola es de exportación se tienen que cumplir rigurosamente los controles de calidad. En el caso de Estados Unidos, si algo está fuera de lo requerido, pueden castigar a la plantación y no comprar más producto; en Europa incluso pueden cancelar todas las importaciones del país.

Asimismo, Upala Agrícola es una de las empresas líderes en tecnología aplicada, ya que utilizan drones con cámaras especiales para realizar estudios fitosanitarios, las cuales muestran el estado de salud de las plantaciones. En caso de alguna alerta, se envía a la cuadrilla responsable a realizar un muestreo de la zona. Además, diariamente se realizan muestreos manuales.

7.3 COMPROMISO SOCIAL Y AMBIENTAL DE UPALA AGRÍCOLA

Algo importante de mencionar es que Upala Agrícola está sumamente comprometida con la causa ambiental, así como lo indican sus diferentes certificaciones. Uno de sus esfuerzos ambientales es la implementación de sistemas agroforestales. Actualmente tienen una plantación de 30 000 árboles; esto lo realiza con el soporte de la Agencia para la Cooperación Alemana brindando información sobre qué especies sembrar, dónde, cómo y cuándo, con el fin de lograr la conectividad entre bosques; es decir generar un tipo de puente entre zonas boscosas que se encuentran dentro del territorio que comprende para permitir el tránsito de flora y fauna. También se da la siembra de árboles alrededor de los humedales para la conservación de los mismos y para control y/o evitar la erosión de los suelos, se siembra en las orillas una especie de gramíneas conocida como vetiver.

Como se mencionó, Upala Agrícola tiene una extensión aproximada de 2 500 ha, de las cuales sólo 1 600 ha ocupan la producción. De las restantes, hay una parte que está destinada a la conservación de flora y fauna. En la Figura 7.11 se puede observar la distribución de las fincas de producción y las zonas de conservación.

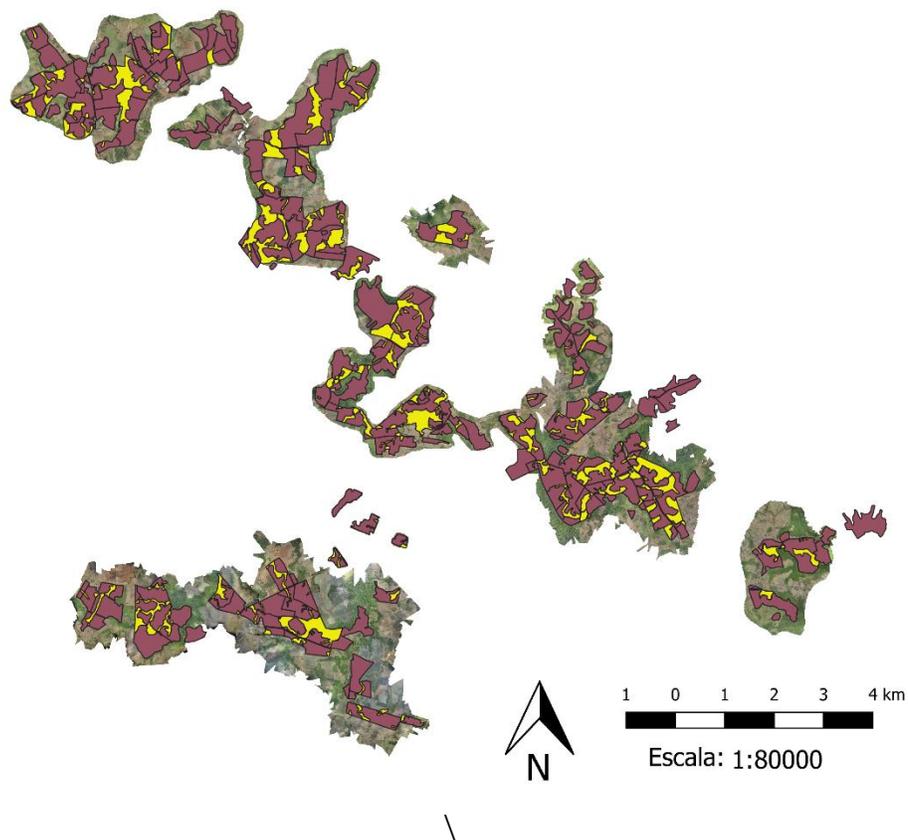


Figura 7.11. Zonas de producción y de conservación de Upala Agrícola

Dentro de su impacto social, Upala Agrícola cuenta con un programa de responsabilidad social-corporativa, donde se colabora con la comunidad, ya sea en recreación o apoyando procesos de formación, por ejemplo, donó un *play* a una de las escuelas de la zona, así como salas de cómputo. Además, cuenta con una Asociación Solidarista con aproximadamente 700 colaboradores. Asimismo, al ser una actividad que se da durante todo el año, genera 1 000 empleos directos, siendo el empleador más grande de la zona. Otro caso del impacto social fue durante el huracán Otto que Upala Agrícola se convirtió en un centro de acopio para repartición de bienes en la comunidad. También dado a la extensión del terreno que abarcan las plantaciones, Upala Agrícola compró una cierta cantidad de motocicletas para que de esta forma le fuera más fácil a los colaboradores movilizarse.

7.4 Posible escenario para implementar en Upala Agrícola S.A

A partir de los resultados obtenidos del diseño experimental, la validación del experimento y la caracterización del rastrojo de piña se procede a plantear un posible escenario que Upala Agrícola pueda implementar en su planta. Sin embargo, este es un escenario preliminar, dado que el objetivo del proyecto era evaluar el potencial de gasificación, por tanto, otras actividades anteriores o posteriores al sistema de gasificación deben ser evaluadas con mayor profundidad en estudios a futuro. Como una estimación gruesa, se puede describir el sistema de gasificación como se muestra en la Figura 7.12. La etapa de pretratamiento comprende una serie de operaciones unitarias, como son el prensado, la molienda y el secado. Por su parte, la etapa de gasificación hace referencia al tipo de gasificador que se podría utilizar, así como las condiciones a las cuales debería operar. Por último, se tiene la etapa de limpieza del gas o recuperación, dado que en el proceso se forman algunos gases que no son de interés, por lo que esta etapa es de suma importancia y a partir de ésta decidir la ruta a seguir para el aprovechamiento del *syngas*.



Figura 7.12. Etapas para un sistema de gasificación

El rastrojo de piña presenta dos inconvenientes para su procesamiento: el tipo de fibra y la humedad que contiene. La hoja en su exterior es sumamente dura, por lo que, para lograr exponer la fibra, se debe someter a un proceso de cortado y trituración. Al realizar estas dos operaciones es cuando el agua que contiene “queda expuesta” y empieza a ser un inconveniente, porque empieza su proceso de degradación. Además, la reducción de tamaño es importante porque sus fibras se podrían describir como hilos y de esa forma no son útiles para el proceso de gasificación. Físicamente, el rastrojo de piña es similar a la caña de azúcar, por lo que se proponer utilizar un sistema de pretratamiento semejante al que se utiliza para la extracción del jugo de la caña de azúcar.

La reducción de tamaño en la industria azucarera es de suma importancia dado que permite una mejor extracción del jugo y la humedad final del bagazo será menor (Rein, 2007). Asimismo, para el sistema de gasificación, la diferencia es que, en este caso, la materia prima de mayor interés será el sólido, mientras que en un ingenio es el jugo. Sin embargo, los equipos utilizados para la extracción de jugo de la caña de azúcar serán útiles para la extracción de agua presente en el rastrojo de piña. Dicha reducción de tamaño se puede llevar a cabo utilizando picadoras o desfibradoras. A pesar de que, las desfibradoras producen una densidad aparente mayor que las cortadoras, se escogerán las cortadoras, debido a que se obtendrá el rastrojo con un tamaño de partícula menor (Rein, 2007). Además, las desfibradoras generan fibras más largas, lo cual no es beneficioso en el caso en cuestión. En la Figura 7.13 se muestra un diagrama de una picadora y en la Figura 7.14, el de una desfibradora.

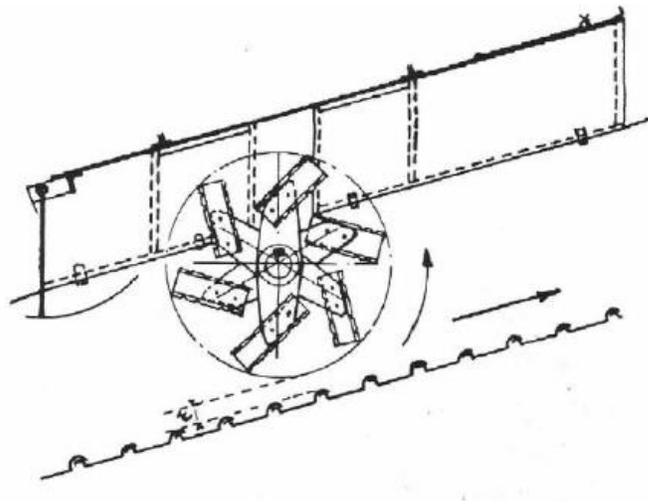


Figura 7.13. Diagrama de una picadora para caña de azúcar (Hugot, 1986)

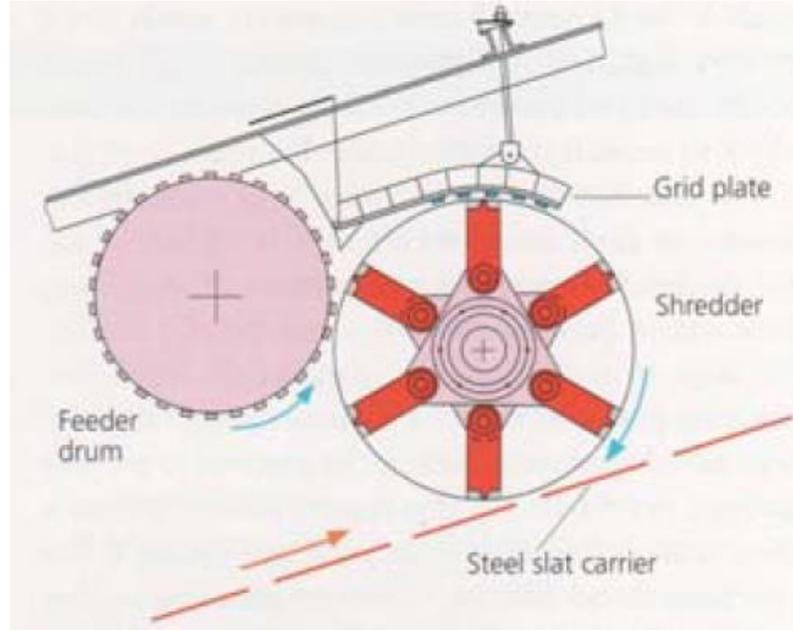


Figura 7.14. Diagrama de una desfibradora para caña de azúcar (Rein, 2007)

La siguiente etapa del proceso será la molienda, donde se propone utilizar molinos como los utilizados en la industria azucarera, el cual es un molino de compresión de rodillos. Este sistema tiene una ventaja sobre la operación de prensado. La operación de prensado ha sido estudiada en el caso de la pulpa de café; por medio del uso de una prensa helicoidal se logró reducir la humedad de un 80 %-85 % a un 74 %, lo que implica una disminución del 10 % del contenido de agua en la pulpa de café (Torres, Molina, Urvina, Castillo, & Chaves, 2016).

Mientras que de los molinos, representados en la Figura 7.15, se obtiene un bagazo con una humedad en un rango del 45 % al 54 % (Díaz, 2008), considerando que la humedad inicial de la caña de azúcar es de 73 % (Chaves M. , s.f), lo que implica una reducción en la humedad de la biomasa de alrededor del 20 %. Otro dato relevante es que, para lograr ese porcentaje de humedad, los ingenios utilizan un tándem de 6 molinos y cada uno de esos molinos con 4 mazas (Alvarez, Ramírez, & Rosero, s.f). Los molinos tienen una capacidad variable, por ejemplo, en época de zafra, puede llegar a procesar 290 t/h (Canales, 2019).

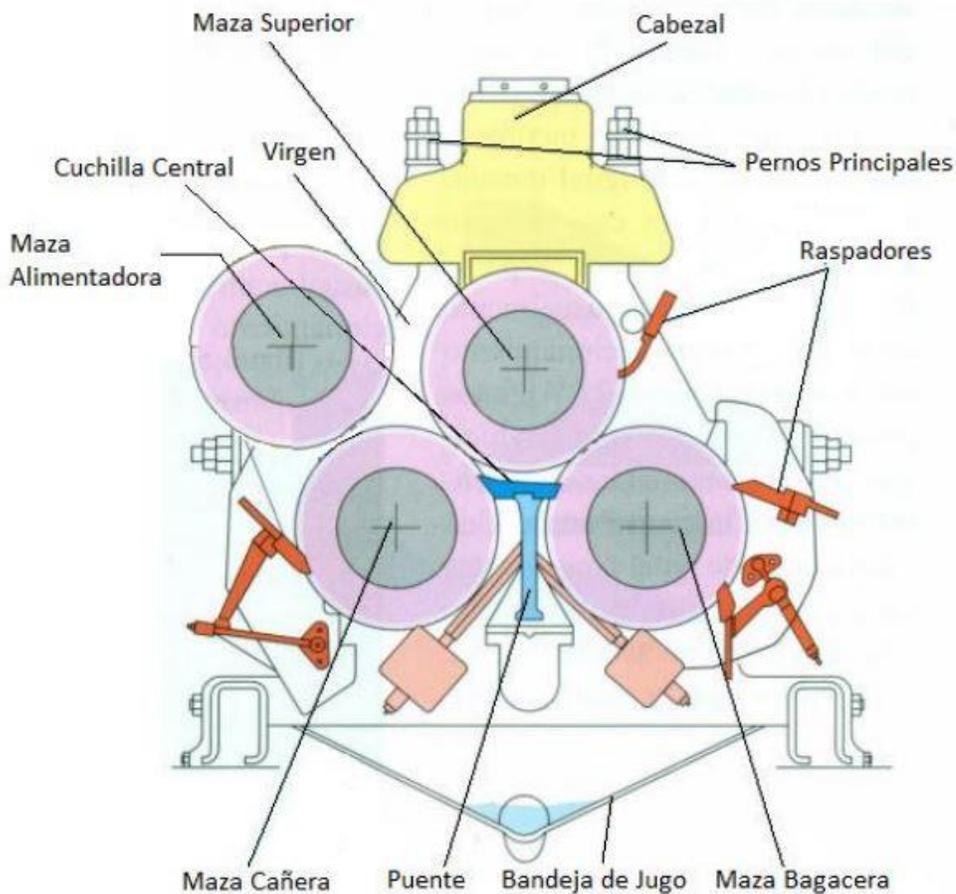


Figura 7.15. Molino tradicional de 4 mazas para caña de azúcar (Febles, 2016)

Con respecto al secado de la biomasa, existen diferentes tipos de secadores, los cuales pueden ser directos o indirectos, por lotes o continuos. Se propone el uso de uno de tipo continuo, dado que si se utilizara uno tipo *batch* sería necesaria mano de obra que cada cierto tiempo esté cargando y descargando el equipo. En el Cuadro 7.1 se muestra una serie de secadores y cuáles se pueden utilizar dependiendo de cómo es el material que se desea secar. Debido a las características del rastrojo de piña, se puede clasificar como una fibra, dado que no es un sólido cristalino, ni se encuentra en forma de pellet, ni de polvo. Por tanto, según la información presentada por Hall (2016), los secadores directos que son aptos son: banda transportadora, flash, rotatorio y de bandeja; mientras que los indirectos que son adecuados son el de chaqueta con vapor, tubos con vapor o bandeja. Al utilizar un secador de tipo directo (o por convección), como se debe asegurar a bajas temperaturas (no

sobrepasar los 55 °C), se requiere una deshumidificación del aire cuando la humedad relativa es alta (Perry & Green, 2008), como es el caso de la zona de Upala. Perry (2008) indica que un secador directo de tipo rotatorio es apto para sólidos fibrosos y con altas capacidades de procesamiento. Por lo que se propone, el uso de un secador de este tipo y se debe incluir en el sistema un deshumidificador para el aire.

Cuadro 7.1. Clasificación de los tipos de secador según el tipo de alimentación (Hall, 2006)

Tipo de secador	Líquidos			Tortas			Free-flowing solids			Sólidos	
	So	Sl	P	C	F	Po	G	Cr	Pt	Fb	
Secadores por convección	Banda transportadora						x	x	x	x	x
	Flash			x	x	x	x			x	
	Fluidizado	x	x		x	x	x		x		
	Rotatorio				x	x	x		x	x	
	Spray	x	x	x							
	Bandeja (continuo)				x	x	x	x	x	x	x
	Bandeja (batch)				x	x	x	x	x	x	
Secadores por conducción	Tambor	x	x	x							
	Chaqueta con vapor				x	x	x	x		x	x
	Tubos con vapor				x	x	x	x		x	x
	Bandeja (batch)				x	x	x	x	x	x	x
	Bandeja (continuo)				x	x	x	x	x	x	

*So: Solución Sl: Slurry P: Pastas C: Centrifugado F: Filtrado Po: Polvo G: Granulado Cr: Cristalino Pt: Pellets Fb: Fibras

Seguidamente, el rastrojo de piña ingresaría al equipo de reacción. El *CREC RISER Simulator* es un gasificador de lecho fluidizado burbujeante a escala de laboratorio. Por tanto, se propone uno de éstos para el escenario en cuestión. Aunque podría utilizarse uno de tipo circulante cuyo funcionamiento es similar, la diferencia es que el circulante tiene el ciclón incorporado, lo que permite la recirculación de las partículas sólidas al reactor, aumentando así la conversión de carbono. Sin embargo, se propone el burbujeante en este caso dado que es un estudio preliminar. En una etapa posterior, se podría utilizar uno circulante. Otra opción es realizar una simulación para comparar los resultados que se puedan obtener por medio de un circulante y uno burbujeante, en la Figura 7.16 se observa un diagrama de cada una de las configuraciones, donde se puede observar la principal diferencia entre ambas. Es importante destacar que antes del secador se encontrará una tolva dosificadora para de esa

forma tener un control adecuado de la cantidad que tiene que estar ingresando al reactor por unidad de tiempo (ya sean minutos u horas). Además, en el caso de la configuración elegida, la corriente de salida es una mezcla de gas y sólido, dado que arrastra tanto el gas producido como el *biochar*, por lo que se debe colocar un ciclón para lograr separar el *biochar* y aprovecharlo en una etapa posterior.

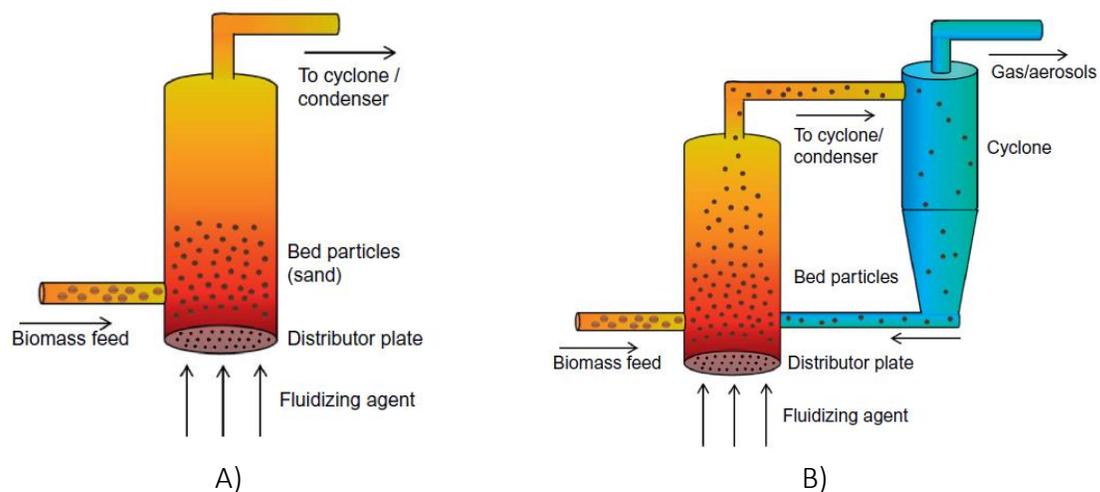


Figura 7.16. Configuraciones de gasificadores de lecho fluidizado A) Burbujeante B) Circulante (Resende, 2014)

Asimismo, bajo la ideología de la economía circular y de la mano con el compromiso ambiental de Upala Agrícola, se propone el aprovechamiento de todo aquello obtenido durante el proceso tanto de pretratamiento como de gasificación. Por tanto, se propone que el líquido que se obtiene en los molinos sea utilizado en un proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás y el *biochar* (producto sólido de la gasificación) se puede utilizar como fertilizante, ya sea solo o en una mezcla con un fertilizante orgánico (compost). Además, luego de que el sistema esté en funcionamiento, se podría evaluar la posibilidad de utilizar el dióxido de carbono producido como agente gasificante; es decir, hacer una recirculación del mismo al sistema de reacción. Esto se puede observar en el esquema de la Figura 7.17.

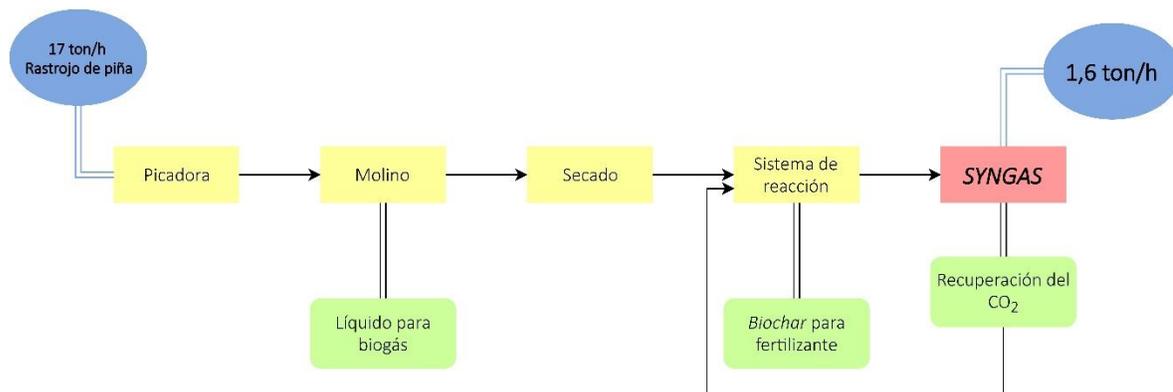


Figura 7.17. Esquema de aprovechamiento de cada producto generado durante el proceso de gasificación (Elaboración propia)

A partir de los datos obtenidos con las corridas de validación del experimento, se obtienen los valores promedio utilizados para la aproximación del escenario para Upala Agrícola, los cuales se muestran en el Cuadro 7.2; cabe destacar que en los experimentos se utilizó 0.04 g de biomasa, por lo que el valor obtenido para 100 g de rastrojo de piña se obtuvo extrapolando los datos experimentales.

Cuadro 7.2. Cantidades producidas de gas y de *biochar*

	Parámetro	Valor
Por 0.04 g de rastrojo de piña alimentado	Masa de gas producido /(g)	0.022
	Masa de <i>biochar</i> /(g)	0.011
Por 100 g de rastrojo	Masa de gas producido /(g)	55.0
	Masa de <i>biochar</i> /(g)	27.5

Como se ha mencionado anteriormente, una de las ventajas de la actividad piñera es que su producción se da a lo largo de todo el año. Upala Agrícola tiene una jornada de lunes a sábado, donde se prepara terreno, se siembra, se cosecha y se tritura; incluso hay ocasiones en las que se extiende a domingo.

El rastrojo está disponible durante todo el año, sin embargo, dependiendo de la época así es la cantidad generada. Durante los meses de enero a mayo se tiene una producción de rastrojo de 4400 t/semana, mientras que en la época de junio a diciembre es de 1980t/semana.

En la Figura 7.18 se muestra el comportamiento por mes de las exportaciones de 2018 y en la Figura 7.19, el de las hectáreas cosechadas durante las 52 semanas de 2018, con lo que se puede observar que hay un pico de producción cercano al mes de junio, por lo que se podría decir que, en esa época hay mayor cantidad de rastrojo disponible.

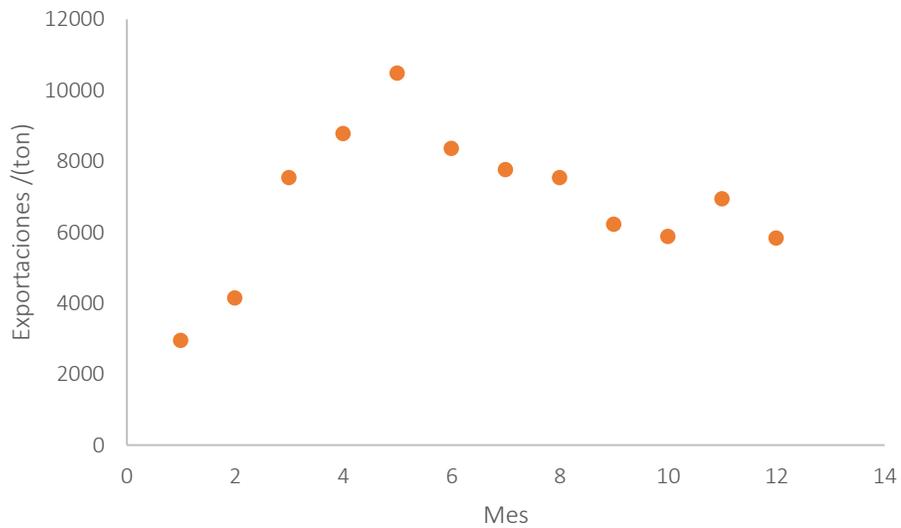


Figura 7.18. Exportaciones de Upala Agrícola de 2018

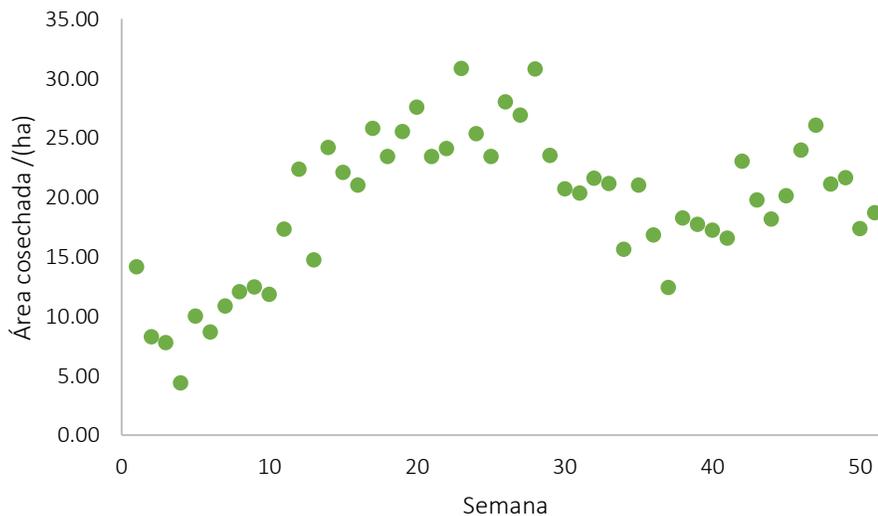


Figura 7.19. Cantidad de hectáreas cosechadas de 2018

Con lo anterior, se tiene materia prima para la gasificación durante todo el año. Para tener una producción constante de *syngas* todo el año, en los picos de cosecha se puede almacenar, dado que se tiene la ventaja que mientras la planta no sea triturada, o sea, esté

enterada, puede ser almacenada hasta por un período de 3 meses, sin tener una descomposición visible; aunque se debería hacer en un futuro un estudio más preciso de su almacenamiento. En promedio por cada hectárea cosechada se producen 150 t de rastrojo; con dicho valor y las hectáreas cosechadas en 2018 se obtiene el gráfico que se muestra en la Figura 7.20, donde la línea anaranjada corresponde al promedio de rastrojo, en toneladas. Por lo que dicha cantidad será con la cual se trabajará el escenario, los excedentes que se dan entre las semanas 14 y 33, deben ser almacenados para poder ser utilizados durante las semanas 1 y 13, además de las semanas 33 y 44. De esa forma se tendrá disponible por semana 2900 t de rastrojo. Como se deseada instalar un sistema continuo, se tomará la jornada de lunes a domingo; es decir, los 7 días de la semana, por lo tanto, por día se debería procesar 415 t (17 t/h). Este valor corresponde al valor de entrada (la corriente 1 del DFP). Se considerará un 10 % de pérdida en el transporte desde los bloques de siembra hasta la planta, donde se ubicaría el sistema de gasificación. Seguidamente, se considerará otra reducción del 10 % por pérdidas en la picadora.

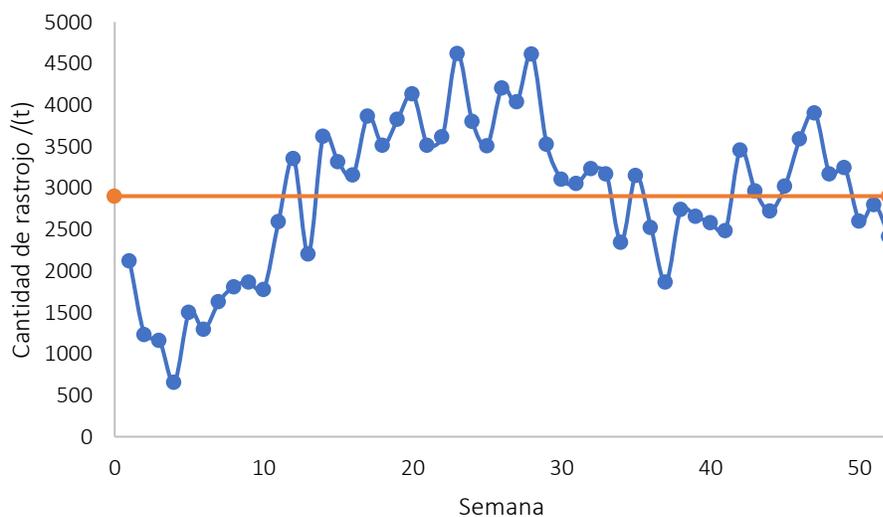


Figura 7.20. Cantidad de rastrojo disponible durante 2018

Como se explicó en el Capítulo 6, la temperatura de secado del rastrojo de piña es importante, por lo que ésta no debe superar los 55 °C para asegurar un secado uniforme de toda la biomasa y evitar puntos calientes. El agente gasificante que se utilizará es el vapor

de agua, dado que las proyecciones presentadas se realizaron a partir de los datos obtenidos experimentalmente con las corridas de validación de reproducibilidad, en las cuales se utilizó helio como coadyuvante de fluidización y vapor de agua como agente gasificante. Sin embargo, por cuestiones económicas se podría utilizar aire en lugar de helio. Debido que la temperatura de reacción es de 550 °C, en una etapa inicial se deberá realizar un calentamiento utilizando ya sea vapor o electricidad. Sin embargo, cuando el sistema ya esté en funcionamiento, se podría utilizar el gas producido que tiene una temperatura de alrededor de 550 °C ya sea para el secado del rastrojo o para calentamiento del reactor. En la Figura 7.21 se puede observar el proceso planteado para la producción de *syngas* a partir de rastrojo de piña (en los anexos se encuentra en DFP completo). A partir de las estimaciones realizadas, se obtendrían los valores que se tabulan en el Cuadro 7.3, con una base de cálculo de 1 h.

Cuadro 7.3. Productos del sistema de gasificación de rastrojo de piña

Cantidad /(t/h)			
Rastrojo de piña	Líquido del molino	<i>Syngas</i>	<i>Biochar</i>
17	6.5	1.6	0.8

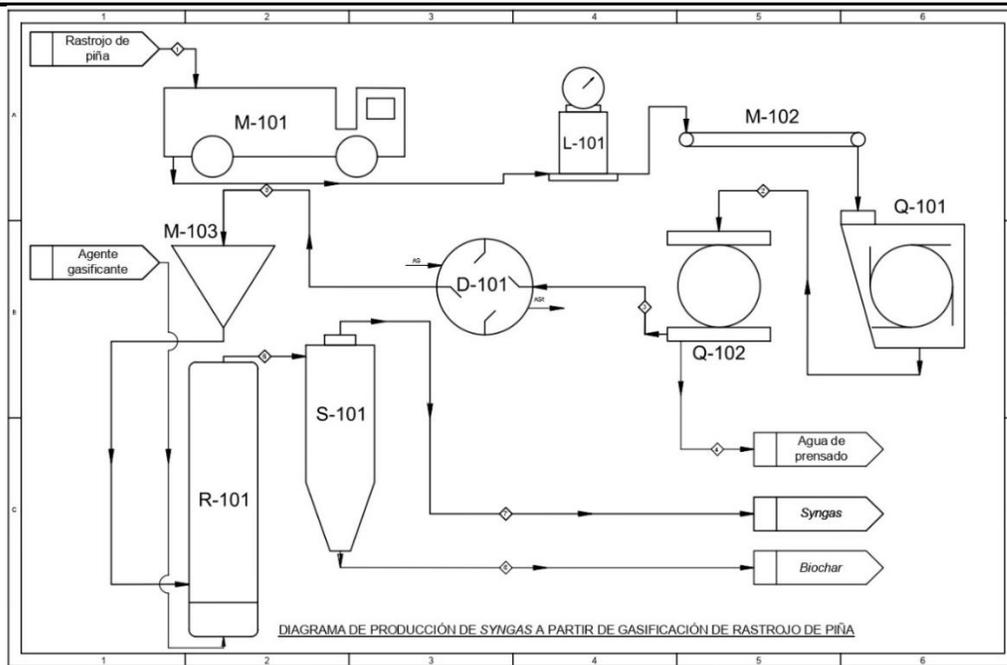


Figura 7.21. Diagrama de flujo de proceso para producción de *syngas* a partir de rastrojo de piña

8 CAPÍTULO 8:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- En el proceso de gasificación de rastrojo de piña se obtiene un gas compuesto principalmente de dióxido de carbono, metano, monóxido de carbono e hidrógeno y poca presencia de alquitranes (alrededor del 5 %)
- Por cada 100 g de rastrojo de piña, se obtiene 55 g de *syngas* y 27.5 g de *biochar*.
- El gas obtenido tiene una composición molar libre de dióxido de carbono, de hidrógeno 28.4 %, metano 34.9 % y monóxido de carbono 36.7 %.
- El rastrojo de piña tiene un mejor rendimiento en la producción de metano comparado con astillas y pellets de madera y broza de café, cuyo promedio es de 20% versus 35 % con el rastrojo.
- Con el análisis de carbohidratos estructurales, se determinó que el rastrojo de piña, de la zona de Quebrada Grande de Yolillal de Upala, es del tipo CHL, dado a los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina presentes: 57.5 %, 37.6 % y 4.9 %, respectivamente.
- La humedad inicial del rastrojo de piña es de 80 % con un porcentaje de ceniza de 6.7%.
- Con el análisis último, se determinó que la fórmula molecular del rastrojo de piña es $CH_{1.8}O_{0.8}$, con un peso molecular estimado de 26.96 g/mol.
- El análisis próximo indica que el contenido de cenizas es de 6.7 %, la materia volátil 84.7 % y el carbono fijo 9.1 %.
- Según su composición, las cenizas se clasifican como de acidez media.
- El diseño experimental es válido dado que, al verificar los supuestos de aleatoriedad, varianza constante y normalidad, bajo el método gráfico, éstos se cumplen para cada una de las variables estudiadas.

- Las mejores condiciones para la gasificación de rastrojo de piña son 550 °C, S/B de 0.2 y vapor de agua como agente gasificante y helio como coadyuvante de fluidización.
- Los problemas presentados en algunos balances de carbono se dieron debido a los problemas con la cuantificación de agua del sistema.
- Por la composición del gas obtenido, la mezcla corresponde a una de tipo poder calórico medio.
- Por medio de las corridas de validación, se puede afirmar que el experimento cuenta con repetibilidad. Sin embargo, al ser solamente un analista, no se estudió la reproducibilidad del mismo.
- Según la producción de Upala Agrícola de 2018, un sistema de gasificación tendría la capacidad de producir 1.6 t/h de *syngas*, 6.5 t/h de líquido para digestión anaerobia u otros usos y 0.8 t/h de *biochar* a partir de 17 t/h de rastrojo de piña.
- El sistema estará compuesto de una picadora, un molino de compresión de rodillos, un secador rotatorio con un deshumidificador de aire y un reactor de lecho fluidizado burbujeante.

8.2 Recomendaciones

- Realizar un estudio más exhaustivo del pretratamiento que se le debe dar a la biomasa (rastrojo de piña), dado que debido a la cantidad necesaria para desarrollar este estudio se hizo utilizando equipos poco industriales, como la corta, el prensado y el secado.
- Realizar un estudio sobre curvas de secado para el rastrojo de piña.
- Realizar un estudio más exhaustivo de los factores que influyen en el proceso de gasificación para lograr determinar un mecanismo de reacción que se adapte al rastrojo de piña.
- Realizar un estudio de multi-variables con el fin de aumentar la potencia del experimento y disminuir el porcentaje de error.

- Realizar un estudio para verificar si el tamaño de partícula tiene algún efecto significativo sobre el *syngas* obtenido.
- Realizar un estudio, el cual puede ser por medio de simulación, sobre la reinyección al sistema del dióxido de carbono producido como agente gasificante.
- Realizar un análisis del sistema de limpieza del *syngas* para su eventual aprovechamiento.
- Realizar un análisis de CHONS del *biochar* para analizar las relaciones O/C y H/C.

9 NOMENCLATURA

<i>FDA</i>	Fibra detergente ácida	%
<i>FDN</i>	Fibra detergente neutro	%
<i>H</i>	Humedad	%
<i>MV</i>	Materia volátil	%
<i>CV</i>	Coefficiente de variación	%
<i>S/B</i>	Relación vapor/biomasa	adim
<i>T</i>	Temperatura	K
<i>DBO</i>	Demanda biológica de oxígeno	mg/L
<i>BQO</i>	Demanda química de oxígeno	mg/L
<i>V</i>	Volumen	mL
<i>P</i>	Presión	psi
<i>R</i>	Constante de los gases	psi mL/K mol
<i>A</i>	Factor de agente gasificante	
<i>B</i>	Factor de temperatura	
<i>C</i>	Factor de S/B	
<i>E</i>	Efecto	
<i>I</i>	Interacción	
<i>Y</i>	Valor experimental	
<i>N</i>	Número de total de datos	
<i>DOE</i>	Diseño de experimento	
<i>Val</i>	Corrida de validación	
<i>TCD</i>	Detector de conductividad térmica	
<i>FID</i>	Detector de ionización de llama	
<i>GC</i>	Cromatógrafo de gases	
<i>k</i>	Número de experimentos	
<i>m</i>	Masa	g
<i>n</i>	Cantidad de sustancia	mol
<i>n</i>	Número de datos	
<i>p</i>	Número de repeticiones	
<i>s_E</i>	Error estándar	mol
<i>s_y</i>	Varianza	mol
<i>t</i>	Tiempo	s
<i>α</i>	Coeficiente estequiométrico	
<i>β</i>	Coeficiente estequiométrico	
<i>γ</i>	Coeficiente estequiométrico	
<i>δ</i>	Coeficiente estequiométrico	
<i>ε</i>	Coeficiente estequiométrico	
<i>μ</i>	Promedio	
<i>σ</i>	Desviación estándar	

Subíndices

- μ_0 Se refiere al valor teórico
- E_A Se refiere al efecto del factor A
- E_B Se refiere al efecto del factor B
- E_C Se refiere al efecto del factor C
- I_{AB} Se refiere a la interacción entre los factores A y B
- I_{ABC} Se refiere a la interacción entre los factores A, B y C
- I_{AC} Se refiere a la interacción entre los factores A y C
- I_{BC} Se refiere a la interacción entre los factores B y C
- m_c Se refiere a la masa del crisol/cápsula
- m_f Se refiere a la masa final
- m_i Se refiere a la masa inicial
- Y_{prom} Se refiere a los valores experimentales promedio

10 BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, A., Zawawi, N., Kasim, F., Inayat, A., & Khasri, A. (2016). Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1333-1347.
- Alpízar, M., Godínez, J., Medaglia, C., Mora, E., Moreira, L., Segura, S., . . . Ulloa, E. (2017, Mayo). Estadísticas de comercio exterior: Costa Rica 2016. San José, Costa Rica. Retrieved Setiembre 2, 2017, from http://procomer.com/downloads/estudios/estudio_estadistico_2016/AnuarioEstadistico2016.pdf
- Alvarez, J., Ramírez, J., & Rosero, E. (s.f). Modelado del tren de molinos de un ingenio azucarero. Cali, Colombia. Recuperado el 2019 de Agosto de 29, de <http://eventos.saber.ula.ve/eventos/getFile.py/access?contribId=125&sessionId=66&resId=0&materialId=paper&confId=47>
- Amador, R. (s.f). *Programa Biogás: Generación de energía*. San José, Costa Rica: ICE.
- American Society for Testing and Materials*. (2013). Obtenido de E872-82: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels.
- American Society for Testing and Materials*. (2015). Obtenido de E1755-01: Standard test Method for Ash in Biomass.
- Amin, F., Huang, Y., He, Y., Zhang, R., Liu, G., & Chen, C. (2016). Biochar applications and modern techniques for characterization. *Clean Technologies Environmental Policy*, 1457-1473.
- Arauz, L. F. (2011). *Decimoctavo Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Agricultura: prácticas y desafíos ambientales 2011*. San José, Costa Rica.
- Arce, A., Hernández, C., & Amador, R. (s.f). Determinación de la cantidad y composición de biogás a partir de rastrojo de piña (*Ananas comosus*) por medio de un sistema continuo a escala laboratorio. *Programa Biogás-ICE*.
- Baruwa, O. (2013). Profitability and constraints of pineapple production in Osun State, Nigeria. *Journal of Horticultural Research*.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Oxford: Elsevier.
- Canales, C. (29 de Agosto de 2019). (F. Rojas, Entrevistador)
- CANAPEP. (2016). Recuperado el 27 de Agosto de 2017, de <https://canapep.com/historia/>

- CANAPEP. (2017). Alianzas para proyecto productivos a partir de residuos de piña. *Piña de Costa Rica*(26), 6.
- Chaves. (s.f). Retrieved Setiembre 1, 2017, from CANAPEP: <https://canapep.com/pina-economico-social-costa-rica/>
- Chaves, M. (s.f). La maduración, su control y la cosecha de la caña de azúcar. Costa Rica. Recuperado el 27 de Agosto de 2019, de <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/FAmCPeflHfqCIJhAhnzDdGwASTzOdssA>
- Chaves-Flores, M. (2017). *Evaluación de la incidencia de dos combustibles forestales de distinta geometría en el desempeño de un gasificador tipo downdraft (Tesis de licenciatura)*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Crocker, M. (2010). *Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemicals*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- de Lasa, H. (1992). *US Patente nº 5102628*.
- deLasa, H., Salaires, E., Mazumder, J., & Lucky, R. (2011). Catalytic Steam Gasification of Biomass: Catalysts, Thermodynamics and Kinetics. *Chemical Reviews*, 5404-5433.
- Díaz, R. (2008). Caracterización energética del bagazo de caña de azúcar del Ingenio Valdez, Ecuador. *Curso internacional: "Producción y aprovechamiento energético de biomasa"*
- dosSantos, R., Flauzino, W., Alves, H., Ferreira, D., Oliveira, N., & Pasquini, D. (2013). Cellulose nanocrystals from pineapple leaf, a new approach for the reuse of this agro-waste. *Industrial Crops and Products*, 707-714.
- Febles, J. M. (2016). *Lubricación hidrodinámica en los apoyos de los árboles de los molinos de caña (Trabajo de diploma)*. Santa Clara, Cuba: Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Font, C. (2013). Modelling of tar formation and evolution for biomass gasification: A review. *Applied Energy*, 129-141.
- Gandía, L., Arzamendi, G., & Diéguez, P. (2013). *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety*. Elsevier.
- Garita, R. Á. (2014). *La piña*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Gómez, C. (2018). *Evaluación de la incidencia de la zona geográfica de Costa Rica en la composición fisicoquímica de la broza de café para su potencial uso en sistemas de gasificación de leche descendente (Tesis de licenciatura)*. San José, Costa Rica.
- Gómez, M. (2014). *Elementos de estadística descriptiva*. San José, Costa Rica: EUNED.
- González, L. (2012). *Manual técnico para el manejo de rastrojos en el cultivo de piña*. San José, Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería: Servicio Fitosanitario del Estado.

- González, M., Pérez, S., Wong, A., Bello, R., & Yañez, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 229-235.
- Guangul, F., Sulaiman, S., & Ramli, A. (2012). Gasifier selection, design and gasification of oil palm fronds with preheated and unheated gasifying air. *Biosource Technology*, 224-232.
- Gungor, A. (2009). Simulation of the Effect of the Equivalence Ratio on Hydrogen Production in Fluidized Bed Biomass Gasifiers. *13th International Research/Expert Conference: "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*. Hammamet, Túnez.
- Gupta, R., & Demirbas, A. (2010). *Gasoline, Diesel and Ethanol Biofuels from Grasses and Plants*. Cambridge University Press.
- Hall, C. (2006). *Handbook of Industrial Drying* (3ra ed.). (A. Mujumdar, Ed.) Taylor & Francis Group.
- Hamaker, B., Tuncil, Y., & Shen, X. (2019). Chapter 11: Carbohydrates of the Kernel. Elsevier.
- Huffman, F. (2003). Uronic Acids. En *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. Elsevier.
- Hugot, E. (1986). *Handbook of Cane Sugar Engineering* (3ra ed.). Amsterdam: Elsevier.
- IDAE. (2007). *Biomasa: Gasificación*. Madrid: Energías Renovables.
- INEC. (2017). *Una visión del sector agropecuario basada en el CENAGRO 2014*. San José, Costa Rica.
- INTAGRI. (s.f). Recuperado el 08 de Junio de 2019, de <https://www.intagri.com/articulos/frutales/requirimientos-de-fertilidad-de-suelo-para-pi%C3%B1a>
- Jenkins, R. (2015). Thermal Gasification of Biomass- A primer. En A. Dahiya, *Bioenergy* (págs. 261-286). Elsevier.
- Jia, D., Cathary, O., Peng, J., Bi, X., Lim, C., Sokhansanj, . . . Tsutsumi, A. (2015). Fluidization and drying of biomass in a vibrating fluidized bed with pulsed gas flow. *Fuel Processing Technology*.
- Kuhn, A. (2018). *CO2 Biomass Fluidized Gasification: Thermodynamic and Reactivity Studies (Tesis de maestría)*. London, Ontario: University of Western Ontario.
- Kuhn, A., Torres, C., Mazumder, A., & de Lasa, H. (2018). CO2 Biomass Fluidized Gasification: Thermodynamics and Reactivity Studies. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.
- Kumar, A., Eskridge, K., Jones, D., & Hanna, M. (2009). Steam-air fluidized bed gasification of distillers grains: Effects of steam to biomass ratio, equivalence ratio and gasification temperature. *Bioresource Technology*, 2062-2068.

- López-Herrera, M., WingChing-Jones, R., & Rojas-Bourrillón, A. (2014). Meta-análisis de los subproductos de piña (*Ananas comosus*) para la alimentación animal. *Agron. Mesoam*, 383-392.
- Lu, Y., Lu, Y.-C., Hu, H.-Q., Xie, F.-J., Wei, X.-Y., & Fan, X. (2017). Structural Characterization of Lignin and Its Degradation Products with Spectroscopic Methods. *Journal of Spectroscopy*.
- Luque, R., Lin, C., Wilson, K., & Clark, J. (2016). *Handbook of Biofuels Production: Processes and Technologies* (2ed ed.). Cambridge, US: Elsevier.
- Maglianesi, M. A. (2013). Desarrollo de las piñeras en Costa Rica y sus impactos sobre ecosistemas naturales y agro-urbanos. *Biocenosis*, 62-70.
- Mazumder, J. (2014). *Steam Gasification of Biomass Surrogates: Catalyst Development and Kinetic Modelling (PhD Thesis)*. London, Ontario: The University of Western Ontario.
- Mazumder, J., & deLasa, H. (2018). Steam gasification of a cellulosic biomass surrogate using a Ni/La₂O₃-y-Al₂O₃ catalyst in a CREC fluidized riser simulator. Kinetics and model validation. *Fuel*, 101-109.
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (7ma ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
- Ministerio de Salud. (7 de Setiembre de 2017). Recuperado el 27 de Agosto de 2019, de Instituciones y productores de Los Santos se unen para controlar la mosca de establo: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/noticias/noticias-2017/1200-instituciones-y-productores-de-los-santos-se-unen-para-controlar-mosca-de-establo>
- Perry, R., & Green, D. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. . McGraw-Hill.
- PROCOMER. (s.f.). *Portal Estadístico de Comercio Exterior*. Recuperado el Noviembre de 2018, de <http://sistemas.procomer.go.cr/estadisticas/inicio.aspx>
- Rajvanshi, A. (2014). *Biomass Gasification*. Maharashtra: Nimbkar Agricultural Research Institute.
- Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales N33601. (1 de Julio de 2010). Recuperado el 10 de Agosto de 2019, de Sistema Costarricense de Información Jurídica: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=59524
- Rein, P. (2007). *Cane Sugar Engineering*. Berlín: Verlag Dr. Albert Bartens KG.
- Resende, F. (2014). Chapter 1. Reactor configurations and design parameters for thermochemical conversion of biomass into fuels, energy and chemicals. En *Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology* (págs. 1-25). Amsterdam: Elsevier.

- Rostom, S. (2018). *Propane Oxidative Dehydrogenation Under Oxygen-free Conditions Using Novel Fluidizable Catalysts: Reactivity, Kinetic Modeling and Simulation Study (PhD Thesis)*. London, Ontario: The University of Western Ontario.
- Sansaniwal, S., Pal, K., Rosen, M., & Tyagi, S. (2017). Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 363-384.
- Sansaniwal, S., Rosen, M., & Tyagi, S. (2017). Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23-43.
- Schulz, H., Glaser, & Bruno. (2012). Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. *Plant of Nutrition and Soil Science*, 410-422.
- Seguí-Gil, L., & Fito-Maupoe, P. (2018). An integrated approach for pineapple waste valorisation. Bioethanol production and bromelain extraction from pineapple residues. *Journal of Cleaner Production*, 1224-1231.
- Sepúlveda, L., Romani, A., Aguilar, C., & Teixeira, J. (2018). Valorization of pineapple waste for the extraction of bioactive compounds and glycosides using autohydrolysis. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 38-45.
- Tenorio, C., Moya, R., Tomazello, F., & Valaert, J. (2015). Quality of Pellets Made from Agricultural and Forestry Crops in Costa Rican Tropical Climates. *BioResources*, 482-498.
- Torres, C., Molina, D., & Hernández, N. (2016). *Informe técnico: Evaluación del desempeño de la tecnología comercial utilizando residuos de café (Etapa 3 y 4)*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Torres, C., Molina, D., Urvina, L., Castillo, J., & Chaves, M. (2016). *Informe técnico: Densificación de residuos de café para su uso en gasificación*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Torres, C., Urvina, L., & deLasa, H. (2019). A chemical equilibrium model for biomass gasification Application to Costa Rican coffee pulp transformation unit. *Biomass and Bioenergy*, 89-103.
- UCR. (21 de Junio de 2018). Recuperado el 10 de Junio de 2019, de <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/06/21/desechos-de-la-pina-un-dolor-de-cabeza-para-productores.html>
- UNCTAD-INFOCOMM. (2016). *Pineapple*. Ginebra y Nueva York: ONU.
- Vakkilainen, E.-K. (2017). *Steam Generation from Biomass: Construction and Design of Large Boilers*. Chennai, India: Elsevier.

- Valavanidis, A. (Julio de 2018). Concept and Practice of the Circular Economy. Turning goods at the end of their life into resources, closing loops in industrial ecosystems and minimizing waste. Atenas, Grecia: National and Kapodistrian University of Athens. Obtenido de www.chem-tox-ecotox.org/ScientificReviews
- Vassilev, S., Vassileva, C., & Vassilev, V. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Fuel*, 330-350.
- Vigésimosgundo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. (2016). San José, Costa Rica. Recuperado el 31 de Agosto de 2017, de http://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/022/PEN-22-2016-BOOK-BAJA.pdf
- Volio, A. (18 de Marzo de 2018). Recuperado el 11 de Junio de 2019, de Uapala Agrícola: <https://www.upalagricola.com/politica4esp.pdf>
- Yurkanis, P. (2008). *Química orgánica*. (5ta ed.). México: Pearson Education.
- Zainuddin, M., Roshnad, S., Mohd-Noriznan, M., & Dahlan, I. (2014). Effect of Moisture Content on Physical Properties of Animal Feed Pellets from Pineapple Plant Waste. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 224-230.
- Zhou, B., Dichiara, A., Zhang, Y., Zhang, Y., & Zhou, J. (2018). Tar formation and evolution during biomass gasification: An experimental and theoretical study. *Fuel*, 944-953.

APÉNDICES

A. DATOS EXPERIMENTALES

Cuadro A.1. Datos de masa del *DOE1*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	16.525
Jeringa + agua	16.529
Jeringa después de la inyección	16.526
Agua	0.00636
Biomasa	0.04
Agua en la biomasa	0.00336
Relación S/B	0.159
<i>Biochar</i>	0.011

Cuadro A.2. Datos de masa del *DOE2*

Parámetro	Masa, <i>m</i> (g)
Jeringa	18.418
Jeringa + agua	18.425
Jeringa después de inyección	18.418
Agua	0.009
Biomasa	0.021
Agua en la biomasa	0.002
Relación S/B	0.417
<i>Biochar</i>	0.002

Cuadro A.3. Datos de masa del *DOE3*

Parámetro	Masa, <i>m</i> (g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.424
Jeringa después de inyección	18.418
Agua	0.009
Biomasa	0.040
Agua en biomasa	0.003
Relación S/B	0.234
<i>Biochar</i>	0.013

Cuadro A.4. Datos de masa *DOE8*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.425

Jeringa después de inyección	18.418
Agua	0.009
Biomasa	0.021
Agua en biomasa	0.002
Relación S/B	0.417
<i>Biochar</i>	0.005

Cuadro A.5. Datos de masa del *DOE9*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.425
Jeringa después de inyección	18.420
Agua	0.008
Biomasa	0.039
Agua en biomasa	0.003
Relación S/B	0.212
<i>Biochar</i>	0.011

Cuadro A.6. Datos de masa del *DOE11*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.424
Jeringa después de inyección	18.419
Agua	0.008
Biomasa	0.040
Agua en biomasa	0.003
Relación S/B	0.209
<i>Biochar</i>	0.012

Cuadro A.7. Datos de masa del *DOE12*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.425
Jeringa después de inyección	18.418
Agua	0.009
Biomasa	0.020
Agua en biomasa	0.002
Relación S/B	0.434
<i>Biochar</i>	0.004

Cuadro A.8. Datos de masa del *DOE16*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.425
Jeringa después de inyección	18.419
Agua	0.008
Biomasa	0.020
Agua en biomasa	0.002
Relación S/B	0.384
<i>Biochar</i>	0.005

Cuadro A.9. Datos de masa del *DOE4*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.424
Jeringa después de inyección	18.419
Agua	0.008
Biomasa	0.041
Agua en biomasa	0.003
Relación S/B	0.206
<i>Biochar</i>	0.011

Cuadro A.10. Datos de masa del *DOE5*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.426
Jeringa después de inyección	18.419
Agua	0.009
Biomasa	0.020
Agua en biomasa	0.002
Relación S/B	0.434
<i>Biochar</i>	0.005

Cuadro A.11. Datos de masa del *DOE6*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.424
Jeringa después de inyección	18.418
Agua	0.009
Biomasa	0.040
Agua en biomasa	0.003

Relación S/B	0.234
<i>Biochar</i>	0.012

Cuadro A.12. Datos de masa del *DOE7*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.425
Jeringa después de inyección	18.419
Agua	0.008
Biomasa	0.022
Agua en biomasa	0.002
Relación S/B	0.357
<i>Biochar</i>	0.005

Cuadro A.13. Datos de masa del *DOE10*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.424
Jeringa después de inyección	18.419
Agua	0.009
Biomasa	0.042
Agua en biomasa	0.004
Relación S/B	0.203
<i>Biochar</i>	0.013

Cuadro A.14. Datos de masa del *DOE13*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.426
Jeringa después de inyección	18.420
Agua	0.008
Biomasa	0.020
Agua en biomasa	0.002
Relación S/B	0.384
<i>Biochar</i>	0.005

Cuadro A.15. Datos de masa del *DOE14*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.420
Jeringa + agua	18.424
Jeringa después de inyección	18.420
Agua	0.007

Biomasa	0.040
Agua en biomasa	0.003
Relación S/B	0.184
<i>Biochar</i>	0.013

Cuadro A.16. Datos de masa del *DOE15*

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.425
Jeringa después de inyección	18.419
Agua	0.008
Biomasa	0.020
Agua en biomasa	0.002
Relación S/B	0.384
<i>Biochar</i>	0.005

Cuadro A.17. Datos de masa de Val1

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.420
Jeringa + agua	18.425
Jeringa después de inyección	18.420
Agua	0.008
Biomasa	0.040
Agua en biomasa	0.003
Relación S/B	0.209
<i>Biochar</i>	0.011

Cuadro A.18. Datos de masa de Val2

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419
Jeringa + agua	18.423
Jeringa después de inyección	18.419
Agua	0.007
Biomasa	0.040
Agua en biomasa	0.003
Relación S/B	0.184
<i>Biochar</i>	0.011

Cuadro A.19. Datos de masa de Val3

Parámetro	Masa, <i>m</i> /(g)
Jeringa	18.419

Jeringa + agua	18.423
Jeringa después de inyección	18.419
Agua	0.007
Biomasa	0.040
Agua en biomasa	0.003
Relación S/B	0.184
Biochar	0.011

Cuadro A.20. Datos de temperatura de *DOE1*

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	29.1	35.3	32.20	305.35	274.9	548.05
3	74.1	79.3	76.70	349.85	274.9	548.05
6	130.1	135.3	132.70	405.85	274.7	547.85
9	185.1	190.3	187.70	460.85	275.0	548.15
12	241.1	246.3	243.70	516.85	274.9	548.05
15	299.1	304.3	301.70	574.85	274.9	548.05
18	353.1	358.3	355.70	628.85	275.1	548.25
21	409.1	414.3	411.70	684.85	275.0	548.15
24	465.1	471.3	468.20	741.35	275.0	548.15
27	528.1	533.3	530.70	803.85	275.3	548.45
30	540.5	563.5	552.00	825.15	275.4	548.55
33	542.0	548.0	545.00	818.15	275.7	548.85
36	545.8	537.0	541.40	814.55	276.1	549.25
40	547.3	530.5	538.90	812.05	276.3	549.45

Cuadro A.21. Datos de temperatura del *DOE2*

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	25.8	31.5	28.65	301.80	275.0	548.15
3	69.8	75.5	72.65	345.80	275.0	548.15
6	136.8	142.5	139.65	412.80	275.0	548.15
9	204.8	211.5	208.15	481.30	275.1	548.25
12	256.8	262.5	259.65	532.80	275.1	548.25
15	319.8	325.5	322.65	595.80	274.7	547.85
18	388.8	395.5	392.15	665.30	274.8	547.95

21	447.8	454.5	451.15	724.30	275.2	548.35
24	519.8	526.5	523.15	796.30	275.0	548.15
27	584.8	591.5	588.15	861.30	274.9	548.05
30	579.8	603.2	591.50	864.65	275.2	548.35
33	587.5	587.9	587.70	860.85	275.6	548.75
36	588.9	579.5	584.20	857.35	276.0	549.15
40	597.7	612.3	605.00	878.15	276.0	549.15

Cuadro A.22. Datos de temperatura del *DOE3*

Tiempo, <i>t</i> /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	27.5	33.4	30.45	303.60	279.0	552.15
3	73.5	79.4	76.45	349.60	279.6	552.75
6	133.5	138.4	135.95	409.10	279.8	552.95
9	192.5	197.4	194.95	468.10	279.6	552.75
12	249.5	255.4	252.45	525.60	278.8	551.95
15	307.5	312.4	309.95	583.10	277.7	550.85
18	365.5	370.4	367.95	641.10	276.5	549.65
21	423.5	429.4	426.45	699.60	275.0	548.15
24	482.5	488.4	485.45	758.60	274.4	547.55
27	543.5	534.0	538.75	811.90	274.6	547.75
30	541.0	559.9	550.45	823.60	274.6	547.75
33	543.1	544.6	543.85	817.00	274.9	548.05
36	545.7	537.8	541.75	814.90	274.9	548.05
40	547.5	531.7	539.60	812.75	274.8	547.95

Cuadro A.23. Datos de temperatura de *DOE8*

Tiempo, <i>t</i> /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	26.5	32.3	29.40	302.55	275.1	548.25
3	---	81.3	81.30	354.45	275.4	548.55
6	144.2	143.3	143.75	416.90	275.0	548.15
9	193.2	202.3	197.75	470.90	274.7	547.85
12	241.2	261.3	251.25	524.40	275.0	548.15
15	286.2	316.3	301.25	574.40	275.0	548.15
18	334.2	376.3	355.25	628.40	274.8	547.95
21	382.2	435.3	408.75	681.90	275.1	548.25

24	428.2	491.3	459.75	732.90	275.0	548.15
27	474.2	547.3	510.75	783.90	275.1	548.25
30	520.2	553.8	537.00	810.15	275.1	548.25
33	528.2	538.5	533.35	806.50	275.2	548.35
36	538.9	531.8	535.35	808.50	275.2	548.35
40	554.3	563.5	558.90	832.05	275.8	548.95

Cuadro A.24. Datos de temperatura del *DOE9*

Tiempo, <i>t</i> /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	26.1	31.5	28.80	301.95	275.3	548.45
3	68.1	74.5	71.30	344.45	275.4	548.55
6	129.1	135.5	132.30	405.45	275.3	548.45
9	196.1	202.5	199.30	472.45	275.1	548.25
12	262.1	267.5	264.80	537.95	274.7	547.85
15	325.1	331.5	328.30	601.45	274.9	548.05
18	389.1	395.5	392.30	665.45	274.8	547.95
21	454.1	460.5	457.30	730.45	274.8	547.95
24	520.1	526.5	523.30	796.45	274.9	548.05
27	586.1	592.5	589.30	862.45	274.8	547.95
30	571.5	604.7	588.10	861.25	275.1	548.25
33	581.5	586.4	583.95	857.10	275.4	548.55
36	593.5	606.9	600.20	873.35	275.4	548.55
40	592.0	604.1	598.05	871.20	275.8	548.95

Cuadro A.25. Datos de temperatura del *DOE11*

Tiempo, <i>t</i> /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	32.0	38.3	35.15	308.30	277.8	550.95
3	76.0	81.3	78.65	351.80	278.5	551.65
6	138.0	140.3	139.15	412.30	278.9	552.05
9	204.0	199.3	201.65	474.80	279.4	552.55
12	269.0	257.3	263.15	536.30	279.8	552.95
15	333.0	314.3	323.65	596.80	279.8	552.95
18	397.0	371.3	384.15	657.30	279.2	552.35
21	461.0	428.3	444.65	717.80	278.5	551.65
24	528.0	487.3	507.65	780.80	277.2	550.35

27	593.0	545.3	569.15	842.30	276.0	549.15
30	557.2	595.1	576.15	849.30	274.8	547.95
33	583.2	604.0	593.60	866.75	274.5	547.65
36	587.4	589.5	588.45	861.60	275.0	548.15
40	588.4	580.4	584.40	857.55	274.8	547.95

Cuadro A.26. Datos de temperatura del *DOE12*

Tiempo, t / (min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	26.7	32.6	29.65	302.80	275.5	548.65
3	75.7	81.6	78.65	351.80	275.3	548.45
6	143.7	149.6	146.65	419.80	274.9	548.05
9	204.7	211.6	208.15	481.30	274.8	547.95
12	266.7	273.6	270.15	543.30	274.8	547.95
15	330.7	336.6	333.65	606.80	274.9	548.05
18	391.7	398.6	395.15	668.30	274.9	548.05
21	455.7	461.6	458.65	731.80	274.5	547.65
24	518.7	525.6	522.15	795.30	274.7	547.85
27	587.7	594.6	591.15	864.30	275.0	548.15
30	576.5	606.3	591.40	864.55	275.2	548.35
33	583.8	589	586.40	859.55	275.3	548.45
36	585.9	579.3	582.60	855.75	275.7	548.85
40	594.9	611.9	603.40	876.55	275.9	549.05

Cuadro A.27. Datos de temperatura del *DOE16*

Tiempo, t / (min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	29.2	35.4	32.30	305.45	276.8	549.95
3	74.2	79.4	76.80	349.95	275.4	548.55
6	129.2	135.4	132.30	405.45	274.1	547.25
9	190.2	195.4	192.80	465.95	274.5	547.65
12	246.2	251.4	248.80	521.95	274.5	547.65
15	298.2	303.4	300.80	573.95	274.4	547.55
18	360.2	365.4	362.80	635.95	274.6	547.75
21	420.2	425.4	422.80	695.95	274.6	547.75
24	475.2	481.4	478.30	751.45	274.8	547.95
27	536.2	541.4	538.80	811.95	274.6	547.75

30	538.2	546.8	542.50	815.65	274.8	547.95
33	542.0	538.4	540.20	813.35	274.8	547.95
36	544.8	533.4	539.10	812.25	274.9	548.05
40	547.6	531.7	539.65	812.80	274.8	547.95

Cuadro A.28. Datos de temperatura del *DOE4*

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	27.8	33.6	30.70	303.85	275.4	548.55
3	81.8	87.6	84.70	357.85	275.4	548.55
6	146.8	152.6	149.70	422.85	275.2	548.35
9	211.8	217.6	214.70	487.85	275.1	548.25
12	276.8	282.6	279.70	552.85	274.8	547.95
15	340.8	346.6	343.70	616.85	274.9	548.05
18	408.8	415.6	412.20	685.35	274.7	547.85
21	474.8	481.6	478.20	751.35	274.9	548.05
24	544.8	551.6	548.20	821.35	275.0	548.15
27	564.6	612.6	588.60	861.75	275.1	548.25
30	582.4	597.4	589.90	863.05	275.2	548.35
33	586	583.6	584.80	857.95	275.7	548.85
36	598.9	610.6	604.75	877.90	275.9	549.05
40	593.7	603.6	598.65	871.80	276	549.15

Cuadro A.29. Datos de temperatura del *DOE5*

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	29.5	35.5	32.50	305.65	274.5	547.65
3	75.5	82.5	79.00	352.15	274.6	547.75
6	139.5	146.5	143.00	416.15	274.3	547.45
9	201.5	209.5	205.50	478.65	274.5	547.65
12	264.5	271.5	268.00	541.15	274.5	547.65
15	326.5	333.5	330.00	603.15	274.6	547.75
18	385.5	392.5	389.00	662.15	274.6	547.75
21	449.5	457.5	453.50	726.65	274.6	547.75
24	513.5	521.5	517.50	790.65	274.6	547.75
27	578.5	586.5	582.50	855.65	274.6	547.75

30	567.3	594.4	580.85	854.00	274.7	547.85
33	578.2	579.4	578.80	851.95	275.2	548.35
36	591.7	612.2	601.95	875.10	275.1	548.25
40	592.4	595.4	593.90	867.05	275.2	548.35

Cuadro A.30. Datos de temperatura del *DOE6*

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	28.7	34.8	31.75	304.90	275.5	548.65
3	72.7	77.8	75.25	348.40	275.3	548.45
6	133.7	137.8	137.80	410.95	275.0	548.15
9	208.7	169.0	188.85	462.00	274.9	548.05
12	262.7	208.0	235.35	508.50	274.8	547.95
15	322.7	253.0	287.85	561.00	274.9	548.05
18	385.7	301.0	343.35	616.50	274.9	548.05
21	433.7	337.0	385.35	658.50	274.9	548.05
24	492.7	381.0	436.85	710.00	274.8	547.95
27	529.7	408.0	468.85	742.00	275.0	548.15
30	452.4	451.0	451.70	724.85	275.0	548.15
33	491.4	496.0	493.70	766.85	275.0	548.15
36	525.9	541.0	533.45	806.60	275.1	548.25
40	539.5	544.0	541.75	814.90	275.3	548.45

Cuadro A.31. Datos de temperatura del *DOE7*

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	25.4	31.3	28.35	301.50	275.5	548.65
3	68.4	75.3	71.85	345.00	275.4	548.55
6	131.4	138.3	134.85	408.00	275.2	548.35
9	193.4	200.3	196.85	470.00	274.8	547.95
12	260.4	267.3	263.85	537.00	274.6	547.75
15	322.4	329.3	325.85	599.00	274.8	547.95
18	391.4	398.3	394.85	668.00	274.8	547.95
21	454.4	461.3	457.85	731.00	274.8	547.95
24	518.4	525.3	521.85	795.00	274.8	547.95
27	583.4	591.3	587.35	860.50	274.9	548.05

30	582.9	609.4	596.15	869.30	275.0	548.15
33	586.7	593.6	590.15	863.30	275.6	548.75
36	588.0	584.3	586.15	859.30	276.0	549.15
40	588.6	580.0	584.30	857.45	276.5	549.65

Cuadro A.32. Datos de temperatura del *DOE10*

Tiempo, <i>t</i> /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	30.7	37.2	33.95	307.10	275.8	548.95
3	73.7	80.2	76.95	350.10	275.4	548.55
6	133.7	139.2	136.45	409.60	274.1	547.25
9	190.7	196.2	196.20	469.35	274.7	547.85
12	249.7	255.2	252.45	525.60	274.7	547.85
15	309.7	315.2	312.45	585.60	274.6	547.75
18	370.7	376.2	373.45	646.60	274.7	547.85
21	425.7	431.2	428.45	701.60	274.7	547.85
24	478.7	485.2	481.95	755.10	274.7	547.85
27	536.7	543.2	539.95	813.10	274.9	548.05
30	540.1	556.7	548.40	821.55	275.2	548.35
33	543.3	543.3	543.30	816.45	275.4	548.55
36	546.1	537.5	541.80	814.95	275.4	548.55
40	548.0	535.9	541.95	815.10	276.0	549.15

Cuadro A.33. Datos de temperatura del *DOE13*

Tiempo, <i>t</i> /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	33.2	39.7	36.45	309.60	274.6	547.75
3	75.2	80.7	77.95	351.10	274.8	547.95
6	131.2	135.7	133.45	406.60	274.8	547.95
9	188.2	191.7	189.95	463.10	274.9	548.05
12	249.2	252.7	250.95	524.10	274.9	548.05
15	310.2	314.7	312.45	585.60	274.9	548.05
18	371.2	375.7	373.45	646.60	274.7	547.85
21	431.2	435.7	433.45	706.60	275.0	548.15
24	493.2	497.7	495.45	768.60	274.9	548.05
27	519.0	553.7	536.35	809.50	275.1	548.25

30	540.7	554.4	547.55	820.70	275.6	548.75
33	544.1	540.8	542.45	815.60	276.0	549.15
36	546.7	533.3	540.00	813.15	275.2	548.35
40	550.7	537.5	544.10	817.25	276.3	549.45

Cuadro A.34. Datos de temperatura del *DOE14*

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	26.8	32.8	29.80	302.95	275.4	548.55
3	75.8	81.8	78.80	351.95	275.3	548.45
6	136.8	142.8	139.80	412.95	275.0	548.15
9	203.8	210.8	207.30	480.45	274.8	547.95
12	268.8	274.8	271.80	544.95	274.8	547.95
15	332.8	338.8	335.80	608.95	275.0	548.15
18	399.8	405.8	402.80	675.95	275.0	548.15
21	463.8	470.8	467.30	740.45	274.9	548.05
24	528.8	534.8	531.80	804.95	274.9	548.05
27	549.6	590.8	570.20	843.35	274.9	548.05
30	580.9	603.8	592.35	865.50	275.4	548.55
33	585.1	587.3	586.20	859.35	275.9	549.05
36	588.6	585.2	586.90	860.05	276.4	549.55
40	594.0	609.2	601.60	874.75	276.8	549.95

Cuadro A.35. Datos de temperatura del *DOE15*

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	29.7	36.0	32.85	306.00	275.6	548.75
3	72.7	79.0	75.85	349.00	275.5	548.65
6	128.7	135.0	131.85	405.00	275.3	548.45
9	182.7	189.0	185.85	459.00	275.1	548.25
12	237.7	244.0	240.85	514.00	274.8	547.95
15	296.7	303.0	299.85	573.00	274.8	547.95
18	358.7	365.0	361.85	635.00	274.9	548.05
21	415.7	422.0	418.85	692.00	274.9	548.05
24	476.7	483.0	479.85	753.00	275.0	548.15
27	535.7	542.0	538.85	812.00	275.0	548.15

30	540.6	562.0	551.30	824.45	275.2	548.35
33	542.2	546.4	544.30	817.45	275.7	548.85
36	545.8	539.1	542.45	815.60	276.2	549.35
40	547.8	535.7	541.75	814.90	276.6	549.75

Cuadro A.36. Datos de temperatura de Val1

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	25.2	31.1	28.15	301.30	275.4	548.55
3	86.2	92.1	89.15	362.30	275.3	548.45
6	140.2	146.1	143.15	416.30	275.0	548.15
9	201.2	206.1	203.65	476.80	274.8	547.95
12	253.2	259.1	256.15	529.30	274.8	547.95
15	305.2	311.1	308.15	581.30	274.9	548.05
18	357.2	362.1	359.65	632.80	275.0	548.15
21	408.2	414.1	411.15	684.30	275.0	548.15
24	466.2	472.1	469.15	742.30	275.0	548.15
27	521.2	527.1	524.15	797.30	275.2	548.35
30	530.1	540.4	535.25	808.40	275.3	548.45
33	544.7	531.0	537.85	811.00	275.8	548.95
36	550.1	566.4	558.25	831.40	276.9	550.05
40	544.9	550.1	547.50	820.65	277.2	550.35

Cuadro A.37. Datos de temperatura de Val2

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	26.7	32.6	29.65	302.80	275.3	548.45
3	82.7	87.6	85.15	358.30	274.9	548.05
6	142.7	146.6	144.65	417.80	274.8	547.95
9	196.7	200.6	198.65	471.80	275.0	548.15
12	249.7	253.6	251.65	524.80	274.7	547.85
15	306.7	310.6	308.65	581.80	274.9	548.05
18	361.7	365.6	363.65	636.80	275.0	548.15
21	415.7	419.6	417.65	690.80	274.9	548.05
24	476.7	481.6	479.15	752.30	274.9	548.05
27	538.7	542.6	540.65	813.80	275.2	548.35
30	538.9	558.7	548.80	821.95	275.3	548.45

33	542.6	546.0	544.30	817.45	276.0	549.15
36	545.2	541.1	543.15	816.30	276.4	549.55
40	547.4	538.0	542.70	815.85	276.8	549.95

Cuadro A.38. Datos de temperatura de Val3

Tiempo, t /(min)	Temperatura					
	$T_{reactor\ up}$ /(°C)	$T_{reactor\ down}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(°C)	$T_{promedio}$ /(K)	$T_{vacuum\ box}$ /(°C)	$T_{vacuum\ box}$ /(K)
0	32.6	39.1	35.85	309.00	274.5	547.65
3	78.6	83.1	80.85	354.00	274.8	547.95
6	134.6	138.1	136.35	409.50	274.4	547.55
9	196.6	200.1	198.35	471.50	274.5	547.65
12	249.6	253.1	251.35	524.50	274.5	547.65
15	310.6	315.1	312.85	586.00	274.7	547.85
18	369.6	373.1	371.35	644.50	274.5	547.65
21	427.6	432.1	429.85	703.00	274.6	547.75
24	478.6	482.1	480.35	753.50	274.8	547.95
27	534.6	538.1	536.35	809.50	274.8	547.95
30	540.3	560.1	550.20	823.35	275.1	548.25
33	542.0	544.8	543.40	816.55	275.0	548.15
36	544.9	539.4	542.15	815.30	275.1	548.25
40	547.3	537.0	542.15	815.30	275.1	548.25

Cuadro A.39. Datos de presión del *DOE1*

	Presión, P /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.988	4.171
Vacuum box	2.847	4.247

Cuadro A.40. Datos de presión del *DOE2*

	Presión, P /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	15.048	4.179
Vacuum box	2.838	4.262

Cuadro A.41. Datos de presión del *DOE3*

	Presión, P /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.990	4.232

Vacuum box	2.847	4.315
------------	-------	-------

Cuadro A.42. Datos de presión del *DOE8*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	15.036	4.081
Vacuum box	2.844	4.181

Cuadro A.43. Datos de presión del *DOE9*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	15.002	4.277
Vacuum box	2.787	4.366

Cuadro A.44. Datos de presión del *DOE11*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	15.032	4.247
Vacuum box	2.819	4.345

Cuadro A.45. Datos de presión del *DOE12*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	15.000	4.096
Vacuum box	2.800	4.200

Cuadro A.46. Datos de presión del *DOE16*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.945	4.027
Vacuum box	2.801	4.116

Cuadro A.47. Datos de presión del *DOE4*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.926	4.586
Vacuum box	3.070	4.645

Cuadro A.48. Datos de presión del *DOE5*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.923	4.131
Vacuum box	2.856	4.209

Cuadro A.49. Datos de presión del *DOE6*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.996	4.333
Vacuum box	2.847	4.419

Cuadro A.50. Datos de presión del *DOE7*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	15.008	5.231
Vacuum box	3.851	5.215

Cuadro A.51. Datos de presión del *DOE10*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.989	7.051
Vacuum box	5.565	7.056

Cuadro A.52. Datos de presión del *DOE13*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.864	7.656
Vacuum box	6.611	7.658

Cuadro A.53. Datos de presión del *DOE14*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.917	8.259
Vacuum box	6.779	8.257

Cuadro A.54. Datos de presión del *DOE15*

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	14.784	7.828

Vacuum box 6.713 7.876

Cuadro A.55. Datos de presión de Val1

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	15.035	6.828
Vacuum box	5.435	6.888

Cuadro A.56. Datos de presión de Val2

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	15.047	4.910
Vacuum box	3.466	4.957

Cuadro A.57. Datos de presión de Val3

	Presión, <i>P</i> /(psi)	
	Inicial	Estabilización
Reactor	15.051	5.199
Vacuum box	3.751	5.266

Cuadro A.58. Resultados del *TCD* para *DOE1*

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.2	4.3	4.4	274.1	46.5	0.0471	4.71E-08
Nitrógeno	5.4	5.5	5.8	267159.1	37158.1	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.1	6.2	6.5	17960.9	1875.0	0.0581	5.81E-08
Metano	8.2	8.4	8.5	15682.9	2109.3	0.0474	4.74E-08
Dióxido de carbono	10.7	10.9	11.1	58377.2	7657.2	0.1218	1.22E-07
Agua	14.8	15.0	15.8	96584.3	4217.3		0.00E+00
Alquitranes							9.81E-09
Total							2.88E-07

Cuadro A.59. Resultados del *TCD* para *DOE2*

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.21	4.33	4.37	230.80	31.70	0.0397	3.97E-08
Nitrógeno	5.36	5.53	5.79	285842.40	39710.40	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.16	6.22	6.51	8147.40	944.00	0.0263	2.63E-08

Metano	8.21	8.36	8.58	13823.50	1806.20	0.0417	4.17E-08
Dióxido de carbono	10.73	10.90	11.19	38222.40	4961.80	0.0799	7.99E-08
Agua	14.82	14.98	15.85	102965.10	4438.90		0.00E+00
Alquitranes							9.82E-09
Total							2.00E-07

Cuadro A.60. Resultados del TCD para DOE3

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.18	4.25	4.33	196.20	42.10	0.0337	3.37E-08
Nitrógeno	5.37	5.53	5.77	239911.30	33428.70	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.10	6.16	6.51	16623.00	2044.30	0.0537	5.37E-08
Metano	8.23	8.36	8.51	17078.90	2325.90	0.0516	5.16E-08
Dióxido de carbono	10.75	10.89	11.07	60665.40	8084.90	0.1265	1.27E-07
Agua	14.81	14.95	15.82	121497.00	5414.80		0.00E+00
Alquitranes							1.07E-08
Total							2.81E-07

Cuadro A.61. Resultados del TCD para DOE8

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.19	4.27	4.30	158.00	55.50	0.0272	2.72E-08
Nitrógeno	5.38	5.53	5.76	245149.30	34258.30	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.17	6.22	6.47	7524.10	909.70	0.0243	2.43E-08
Metano	8.24	8.37	8.55	8427.60	1119.70	0.0255	2.55E-08
Dióxido de carbono	10.73	10.90	11.10	35333.40	4607.20	0.0739	7.39E-08
Agua	14.84	14.99	15.81	97075.30	4321.40		0.00E+00
Alquitranes							5.08E-09
Total							1.58E-07

Cuadro A.62. Resultados del TCD para DOE9

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.19	4.24	4.34	328.80	65.30	0.0566	5.66E-08
Nitrógeno	5.39	5.54	5.79	213046.20	29701.50	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.11	6.17	6.52	18003.70	2225.20	0.0582	5.82E-08

Metano	8.19	8.36	8.54	27699.20	3656.10	0.0837	8.37E-08
Dióxido de carbono	10.73	10.89	11.11	78101.10	10196.00	0.1625	1.63E-07
Agua	14.80	14.93	15.78	138149.50	6313.90		0.00E+00
Alquitranes							2.02E-08
Total							3.87E-07

Cuadro A.63. Resultados del TCD para DOE11

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.19	4.30	4.44	422.60	58.70	0.0727	7.27E-08
Nitrógeno	5.37	5.54	5.77	177937.60	24882.70	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.11	6.17	6.55	17728.80	2145.00	0.0573	5.73E-08
Metano	8.22	8.36	8.54	24145.20	3209.00	0.0729	7.29E-08
Dióxido de carbono	10.72	10.89	11.11	72357.30	9470.00	0.1507	1.51E-07
Agua	14.83	14.97	15.78	109209.20	4984.20		0.00E+00
Alquitranes							1.76E-08
Total							3.76E-07

Cuadro A.64. Resultados del TCD para DOE12

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.20	4.33	4.39	218.20	32.30	0.03753	3.75E-08
Nitrógeno	5.38	5.53	5.79	265151.50	36848.00	0.00000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.16	6.22	6.45	7346.80	911.50	0.02375	2.38E-08
Metano	8.22	8.36	8.52	12682.30	1727.90	0.03830	3.83E-08
Dióxido de carbono	10.73	10.89	11.09	41275.70	5375.90	0.08627	8.63E-08
Agua	14.85	14.98	15.82	101545.80	4470.70		0.00E+00
Alquitranes							9.42E-09
Total							1.98E-07

Cuadro A.65. Resultados del TCD para DOE16

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.14	4.36	4.38	179.40	18.60	0.03086	3.09E-08
Nitrógeno	5.35	5.52	5.77	194958.20	27214.80	0.00000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.13	6.19	6.50	9178.20	1084.40	0.02967	2.97E-08

Metano	8.20	8.35	8.55	9267.40	1249.70	0.02799	2.80E-08
Dióxido de carbono	10.70	10.88	11.08	37090.40	4848.70	0.07756	7.76E-08
Agua	14.83	14.96	15.77	102426.70	4618.80		0.00E+00
Alquitranes							6.36E-09
Total							1.75E-07

Cuadro A.66. Resultados del TCD para DOE4

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.16	4.24	4.36	464.00	73.70	0.0798	7.98E-08
Nitrógeno	5.37	5.53	5.82	350084.70	48475.00	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.11	6.16	6.45	15286.50	2090.40	0.0494	4.94E-08
Metano	8.22	8.37	8.53	26616.80	3560.70	0.0804	8.04E-08
Dióxido de carbono	10.74	10.90	11.12	166430.40	21640.10	0.3428	3.43E-07
Agua	14.80	14.95	15.97	145698.60	6240.90		0.00E+00
Alquitranes							1.94E-08
Total							5.78E-07

Cuadro A.67. Resultados del TCD para DOE5

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.13	4.21	4.29	188.60	51.50	0.0324	3.24E-08
Nitrógeno	5.37	5.52	5.78	280722.50	39101.80	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.14	6.20	6.43	8254.50	1124.90	0.0267	2.67E-08
Metano	8.21	8.36	8.53	12987.00	1752.10	0.0392	3.92E-08
Dióxido de carbono	10.71	10.89	11.15	118606.60	15400.70	0.2457	2.46E-07
Agua	14.81	14.96	15.84	112310.10	4952.00		0.00E+00
Alquitranes							9.78E-09
Total							3.56E-07

Cuadro A.68. Resultados del TCD para DOE6

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.18	4.38	4.45	301.90	33.30	0.0519	5.19E-08
Nitrógeno	5.36	5.52	5.76	194427.60	27156.20	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.08	6.15	6.57	19770.50	2310.20	0.0639	6.39E-08

Metano	8.20	8.35	8.50	15774.30	2139.20	0.0476	4.76E-08
Dióxido de carbono	10.70	10.88	11.14	197244.90	25475.10	0.4048	4.05E-07
Agua	14.79	14.92	15.75	138086.90	6425.80		0.00E+00
Alquitranes							9.77E-09
Total							5.82E-07

Cuadro A.69. Resultados del TCD para DOE7

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.11	4.19	4.28	383.70	69.10	0.066	6.60E-08
Nitrógeno	5.34	5.49	5.69	70862.00	9977.90	0.000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.13	6.18	6.55	9435.50	948.90	0.031	3.05E-08
Metano	8.19	8.32	8.48	19295.00	2595.40	0.058	5.83E-08
Dióxido de carbono	10.68	10.86	11.11	217604.00	28154.20	0.446	4.46E-07
Agua	14.71	14.85	16.06	212380.80	9042.70		0.00E+00
Alquitranes							1.14E-08
Total							6.15E-07

Cuadro A.70. Resultados del TCD para DOE10

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.10	4.19	4.29	453.00	79.90	0.0779	7.79E-08
Nitrógeno	5.33	5.48	5.69	86128.30	12136.20	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.07	6.13	6.48	15258.90	1764.70	0.0493	4.93E-08
Metano	8.19	8.32	8.48	19227.20	2617.90	0.0581	5.81E-08
Dióxido de carbono	10.68	10.86	11.14	219310.40	28278.60	0.4489	4.49E-07
Agua	14.63	14.78	15.83	314114.10	14611.10		0.00E+00
Alquitranes							1.15E-08
Total							6.50E-07

Cuadro A.71. Resultados del TCD para DOE13

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.10	4.19	4.32	264.30	37.90	0.0455	4.55E-08
Nitrógeno	5.32	5.48	5.72	125944.60	17551.10	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.15	6.20	6.44	5376.70	691.10	0.0174	1.74E-08

Metano	8.18	8.32	8.47	9059.30	1218.00	0.0274	2.74E-08
Dióxido de carbono	10.70	10.86	11.09	291645.90	37672.60	0.5919	5.92E-07
Agua	14.56	14.74	15.99	405576.10	16366.90		0.00E+00
Alquitranes							5.93E-09
Total							6.89E-07

Cuadro A.72. Resultados del TCD para DOE14

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.09	4.21	4.34	733.20	78.50	0.126	1.26E-07
Nitrógeno	5.34	5.49	5.72	164346.20	22918.70	0.000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.09	6.14	6.54	15133.30	1738.40	0.049	4.89E-08
Metano	8.16	8.33	8.53	27940.40	3642.60	0.084	8.44E-08
Dióxido de carbono	10.70	10.88	11.15	231529.30	29677.60	0.473	4.73E-07
Agua	14.77	14.91	16.02	170131.40	7329.40		0.00E+00
Alquitranes							2.02E-08
Total							7.59E-07

Cuadro A.73. Resultados del TCD para DOE15

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.16	4.22	4.34	258.80	40.60	0.0445	4.45E-08
Nitrógeno	5.34	5.49	5.74	118200.20	16521.90	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.14	6.20	6.37	5647.30	860.40	0.0183	1.83E-08
Metano	8.21	8.34	8.50	10152.30	1329.50	0.0307	3.07E-08
Dióxido de carbono	10.71	10.88	11.17	298694.50	38203.30	0.6057	6.06E-07
Agua	14.83	14.97	15.81	108380.00	4783.80		0.00E+00
Alquitranes							6.34E-09
Total							7.08E-07

Cuadro A.74. Resultados del TCD para Val1

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.11	4.21	4.31	305.00	63.90	0.0525	5.25E-08
Nitrógeno	5.33	5.49	5.72	210131.30	29303.10	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.06	6.12	6.42	16963.90	2229.20	0.0548	5.48E-08

Metano	8.19	8.33	8.50	18302.30	2463.40	0.0553	5.53E-08
Dióxido de carbono	10.72	10.88	11.12	76863.10	9992.90	0.1600	1.60E-07
Agua	14.74	14.87	15.99	192155.40	8534.00		0.00E+00
Alquitranes							9.24E-09
Total							3.36E-07

Cuadro A.75. Resultados del TCD para Val2

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.14	4.22	4.34	265.70	48.30	0.0457	4.57E-08
Nitrógeno	5.33	5.50	5.72	101690.30	14241.30	0.0000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.07	6.13	6.51	18672.40	2155.50	0.0604	6.04E-08
Metano	8.17	8.33	8.50	17169.60	2297.00	0.0519	5.19E-08
Dióxido de carbono	10.72	10.88	11.08	69625.50	9071.30	0.1450	1.45E-07
Agua	14.71	14.85	16.01	218083.10	9754.00		0.00E+00
Alquitranes							8.76E-09
Total							3.16E-07

Cuadro A.76. Resultados del TCD para Val3

Especie	Tiempo (min)			Área	Altura	Concentración /(μ mol)	Concentración /(mol)
	Inicial	Retención	Final				
Hidrógeno	4.13	4.20	4.33	222.60	47.00	0.03829	3.83E-08
Nitrógeno	5.34	5.49	5.66	52410.60	7460.10	0.00000	0.00E+00
Monóxido de carbono	6.04	6.11	6.40	18940.70	2529.90	0.06124	6.12E-08
Metano	8.16	8.32	8.52	20072.90	2627.10	0.06062	6.06E-08
Dióxido de carbono	10.68	10.87	11.12	72718.40	9381.20	0.15143	1.51E-07
Agua	14.72	14.85	16.00	206747.60	9261.10		0.00E+00
Alquitranes							1.14E-08
Total							3.28E-07

Cuadro A.77. Medición de masa para la determinación de humedad del rastrojo de piña

Muestra	Masa, m /(g)		
	m_1	m_2	m_3
1	11.526	11.622	11.613
2	11.475	11.567	11.542
3	11.134	11.256	11.247

Cuadro A.78. Medición de masa para la determinación de la materia volátil del rastrojo de piña

Muestra	Masa, m /(g)			Pérdida de masa / (%)
	m_c	m_i	m_f	
1	29.87	30.74	29.94	91.89
2	22.85	23.85	22.91	93.59
3	26.57	27.58	26.65	92.27

Cuadro A.79. Resultados obtenidos del análisis realizado en el CINA para determinación de carbohidratos estructurales

Análisis	Resultado / (%)
Fibra detergente neutro (FDN)	53.4
Fibra detergente ácido (FDA)	33.3
Lignina	2.6

Cuadro A.80. Cantidad producida de cada gas en cada una de las corridas de validación

Corrida de validación	Cantidad producida /(mol)			
	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
1	0.000214	0.000224	0.000225	0.000653
2	0.000204	0.000269	0.000231	0.000646
3	0.000160	0.000256	0.000253	0.000633

B. CÁLCULOS INTERMEDIOS

Cuadro B.81. Cantidad de hidrógeno producida en cada una de las corridas del diseño experimental

Orden de corrida estándar	Cantidad de hidrógeno producida/ (mol)			
	Y_1	Y_2	Y_{PROM}	S_y^2
1	0.000218	0.000148	0.000183	2.49E-09
2	0.000267	0.000186	0.000226	3.25E-09
3	0.000198	0.000255	0.000226	1.60E-09
4	0.000384	0.000298	0.000341	3.69E-09
5	0.000162	0.000186	0.000174	2.97E-10
6	0.000115	0.000115	0.000115	1.24E-13
7	0.000195	0.000202	0.000199	2.49E-11
8	0.000157	0.000210	0.000184	1.41E-09
Promedio			0.000206	

Cuadro B.82. Cálculo de los efectos e interacciones para la cantidad de hidrógeno

		-	+	Total	Efecto estandarizado
Efectos	E _A	0.000782	0.000866	0.000021	1.050
	E _B	0.000698	0.000950	0.000063	3.143
	E _C	0.000976	0.000672	-0.000076	-3.811
Interacciones	I _{AB}	0.000767	0.000881	0.000029	1.429
	I _{AC}	0.000940	0.000708	-0.000058	-2.900
	I _{BC}	0.000856	0.000792	-0.000016	-0.803
	I _{ABC}	0.000838	0.000810	-0.000007	-0.341

Cuadro B.83. Cantidad de metano producida en cada una de las corridas del diseño experimental

Orden de corrida estándar	Cantidad de metano producida /(mol)			
	Y ₁	Y ₂	Y _{PROM}	S _y ²
1	0.000219	0.000226	0.000222	2.0E-11
2	0.000199	0.000171	0.000185	3.9E-10
3	0.000293	0.000255	0.000274	7.1E-10
4	0.000257	0.000300	0.000278	9.3E-10
5	0.000151	0.000169	0.000160	1.5E-10
6	0.000070	0.000079	0.000074	4.7E-11
7	0.000205	0.000207	0.000206	6.4E-13
8	0.000190	0.000186	0.000188	9.4E-12
Promedio			0.000198	

Cuadro B.84. Cálculo de los efectos e interacciones para la cantidad de metano

		-	+	Total	Efecto estandarizado
Efectos	E _A	0.000863	0.000725	-0.000034	-4.098
	E _B	0.000642	0.000946	0.000076	9.072
	E _C	0.000959	0.000628	-0.000083	-9.862
Interacciones	I _{AB}	0.000739	0.000849	0.000027	3.252
	I _{AC}	0.000829	0.000759	-0.000018	-2.096
	I _{BC}	0.000787	0.000801	0.000004	0.421
	I _{ABC}	0.000781	0.000807	0.000006	0.772

Cuadro B.5. Cantidad de monóxido de carbono producida en cada una de las corridas del diseño experimental

Orden de corridas estándar	Cantidad de monóxido de carbono producida /(mol)			
	Y ₁	Y ₂	Y _{PROM}	S _y ²
1	0.000269	0.000235	0.000252	5.67E-10
2	0.000229	0.000169	0.000199	1.81E-09
3	0.000204	0.000201	0.000202	4.81E-12
4	0.000184	0.000149	0.000167	6.30E-10
5	0.000145	0.000179	0.000162	5.85E-10
6	0.000044	0.000047	0.000046	4.51E-12
7	0.000130	0.000128	0.000129	1.16E-12
8	0.000129	0.000097	0.000113	5.15E-10
Promedio			0.000159	

Cuadro B.85. Cálculo de los efectos e interacciones para la cantidad de monóxido de carbono

		-	+	Total	Efecto estandarizado
Efectos	E _A	0.000745	0.000524	-0.000055	-4.857
	E _B	0.000658	0.000611	-0.000012	-1.045
	E _C	0.000820	0.000450	-0.000093	-8.152
Interacciones	I _{AB}	0.000576	0.000694	0.000029	2.593
	I _{AC}	0.000656	0.000613	-0.000011	-0.952
	I _{BC}	0.000576	0.000693	0.000029	2.569
	I _{ABC}	0.000593	0.000676	0.000021	1.837

Cuadro B.86. Cantidad de dióxido de carbono producida en cada una de las corridas del diseño experimental

Orden de corrida estándar	Cantidad de dióxido de carbono /(mol)			
	Y ₁	Y ₂	Y _{PROM}	S _y ²
1	0.00056	0.00055	0.00056	5.24E-11
2	0.00145	0.00154	0.00149	3.67E-09
3	0.00057	0.00053	0.00055	8.60E-10
4	0.00128	0.00144	0.00136	1.30E-08
5	0.00044	0.00047	0.00045	3.91E-10
6	0.00150	0.00156	0.00153	1.86E-09
7	0.00039	0.00047	0.00043	2.59E-09

8	0.00119	0.00142	0.00130	2.63E-08
		Promedio	0.00096	

Cuadro B.87. Cálculo de los efectos e interacciones para la cantidad de dióxido de carbono

		-	+	Total	Efecto estandarizado
Efectos	E _A	0.00199	0.00569	0.00093	23.724
	E _B	0.00404	0.00364	-0.00010	-2.555
	E _C	0.00396	0.00372	-0.00006	-1.522
Interacciones	I _{AB}	0.00401	0.00368	-0.00008	-2.115
	I _{AC}	0.00374	0.00395	0.00005	1.346
	I _{BC}	0.00390	0.00379	-0.00003	-0.698
	I _{ABC}	0.00388	0.00380	-0.00002	-0.512

Cuadro B.88. Parámetros estadísticos

	H ₂	CH ₄	CO ₂	CO
s _y ²	1.60E-09	2.82E-10	6.09E-09	5.15E-10
s _E ²	3.99E-10	7.05E-11	1.52E-09	1.29E-10
s _E	2.00E-05	8.39E-06	3.90E-05	1.13E-05

Cuadro B.89. Intervalo de no significancia

Límites	H ₂	CH ₄	CO ₂	CO
Inferior	-0.000046	-0.000019	-0.00009	-0.000026
Superior	0.000046	0.000019	0.00009	0.000026

Cuadro B.90. Datos obtenidos a partir de la ecuación de estado

Parámetro	DOE1	DOE2	DOE3	DOE8
<i>Condiciones iniciales</i>				
Gas en reactor /(mol)	0.00206	0.00210	0.00208	0.00209
Fracción de He /(adim)	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
Cantidad de He /(mol)	0.00206	0.00210	0.00208	0.00209
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Gas en vacuum box /(mol)	0.00475	0.00474	0.00474	0.00475
Fracción de He /(adim)	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
Cantidad de He /(mol)	0.00475	0.00474	0.00474	0.00475
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Cantidad total de He /(mol)	0.00682	0.00683	0.00681	0.00684
Cantidad total de CO ₂ /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Cantidad total /(mol)	0.00682	0.00683	0.00681	0.00684
Condiciones finales				
Gas en reactor /(mol)	0.000216	0.000200	0.000219	0.000206
Gas en vacuum box /(mol)	0.007089	0.007114	0.007182	0.006981
Cantidad total de gas /(mol)	0.007305	0.007314	0.007401	0.007187
Cantidad de gas producido /(mol)	0.000490	0.000481	0.000586	0.000349
Cantidad de He /(mol)	0.006815	0.006833	0.006815	0.006838
Fracción de He /(adim)	0.932980	0.934288	0.920835	0.951402
Volumen de gas producido /(mL)	73.973	72.529	87.379	53.640
Balance de carbono				
Carbono inicial /(g)	0.01629	0.00855	0.0163	0.00855
Carbono en gas producido /(g)	0.00594	0.00555	0.0073	0.00398
Carbono en <i>biochar</i> /(g)	0.00724	0.00134	0.0086	0.00342
%	81%	81%	97%	86%

Cuadro B.12. Datos obtenidos a partir de la ecuación de estado

Parámetro	DOE9	DOE11	DOE12	DOE16
Condiciones iniciales				
Gas en reactor /(mol)	0.00209	0.00205	0.00208	0.00206
Fracción de He /(adim)	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
Cantidad de He /(mol)	0.00209	0.00205	0.00208	0.00206
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Gas en vacuum box /(mol)	0.00465	0.00469	0.00467	0.00468
Fracción de He /(adim)	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
Cantidad de He /(mol)	0.00465	0.00469	0.00467	0.00468
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Cantidad total de He /(mol)	0.00674	0.00674	0.00676	0.00674
Cantidad total de CO ₂ /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Cantidad total /(mol)	0.00674	0.00674	0.00676	0.00674
Condiciones finales				
Gas en reactor /(mol)	0.000206	0.000208	0.000197	0.000208
Gas en vacuum box /(mol)	0.007289	0.007223	0.007012	0.006875
Cantidad total de gas /(mol)	0.007495	0.007431	0.007208	0.007083
Cantidad de gas producido /(mol)	0.000753	0.000695	0.000451	0.000347
Cantidad de He /(mol)	0.006742	0.006736	0.006757	0.006736
Fracción de He /(adim)	0.899540	0.906444	0.937419	0.950997

Volumen de gas producido /(mL)	110.882	103.262	69.074	54.087
Balance de carbono				
Carbono inicial /(g)	0.01589	0.0163	0.00815	0.00815
Carbono en gas producido /(g)	0.00973	0.0085	0.00530	0.00407
Carbono en <i>biochar</i> /(g)	0.00743	0.0081	0.00267	0.00342
%	108%	102%	98%	92%

Cuadro B.91. Datos obtenidos a partir de la ecuación de estado

Parámetro	DOE4	DOE5	DOE6	DOE7
Condiciones iniciales				
Gas en reactor /(mol)	0.00207	0.00205	0.00207	0.00209
Fracción de He /(adim)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Cantidad de He /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.00207	0.00205	0.00207	0.00209
Gas en vacuum box /(mol)	0.00512	0.00477	0.00475	0.00643
Fracción de He /(adim)	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
Cantidad de He /(mol)	0.00512	0.00477	0.00475	0.00643
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Cantidad total de He /(mol)	0.00512	0.00477	0.00475	0.00643
Cantidad total de CO ₂ /(mol)	0.00207	0.00205	0.00207	0.00209
Cantidad total /(mol)	0.00719	0.00682	0.00682	0.00852
Condiciones finales				
Gas en reactor /(mol)	0.000221	0.000200	0.00022	0.000257
Gas en vacuum box /(mol)	0.007753	0.007032	0.00738	0.008704
Cantidad total de gas /(mol)	0.007974	0.007232	0.00760	0.008961
Cantidad de gas producido /(mol)	0.000785	0.000408	0.00078	0.000441
Cantidad de He /(mol)	0.005124	0.004772	0.00475	0.006427
Fracción de He /(adim)	0.867196	0.921293	0.85898	0.935852
Volumen de gas producido /(mL)	146.58	86.87	155.66	70.80
Balance de carbono				
Carbono inicial /(g)	0.0167	0.00815	0.0163	0.00896
Carbono en gas producido /(g)	0.0102	0.00549	0.0096	0.00597
Carbono en <i>biochar</i> /(g)	0.0075	0.00345	0.0082	0.00345
%	106%	110%	109%	105%

Cuadro B.92. Datos obtenidos a partir de la ecuación de estado

Parámetro	DOE10	DOE13	DOE14	DOE15
Condiciones iniciales				

Gas en reactor /(mol)	0.00205	0.00202	0.00207	0.00203
Fracción de He /(adim)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Cantidad de He /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.00205	0.00202	0.00207	0.00203
Gas en vacuum box /(mol)	0.00929	0.01104	0.0113	0.0112
Fracción de He /(adim)	1.00000	1.00000	1.0000	1.0000
Cantidad de He /(mol)	0.00929	0.01104	0.0113	0.0112
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000
Cantidad total de He /(mol)	0.00929	0.01104	0.0113	0.0112
Cantidad total de CO ₂ /(mol)	0.00205	0.00202	0.0021	0.0020
Cantidad total /(mol)	0.01134	0.01306	0.0134	0.0132
Condiciones finales				
Gas en reactor /(mol)	0.00036	0.00039	0.00040	0.00040
Gas en vacuum box /(mol)	0.01178	0.01278	0.01378	0.01314
Cantidad total de gas /(mol)	0.01215	0.01318	0.01418	0.01355
Cantidad de gas producido /(mol)	0.00080	0.00012	0.00079	0.00031
Cantidad de He /(mol)	0.00929	0.01104	0.01131	0.01120
Fracción de He /(adim)	0.92072	0.98893	0.93447	0.97272
Volumen de gas producido /(mL)	87.50	12.216	72.33	30.11
Balance de carbono				
Carbono inicial /(g)	0.0171	0.00815	0.0163	0.00815
Carbono en gas producido /(g)	0.0097	0.00206	0.0101	0.00425
Carbono en <i>biochar</i> /(g)	0.0089	0.00338	0.0089	0.00338
%	109%	67%	117%	94%

Cuadro B.93. Datos obtenidos a partir de la ecuación de estado

Parámetro	Val1	Val2	Val3
Condiciones iniciales			
Gas en reactor /(mol)	0.00210	0.00209	0.00205
Fracción de He /(adim)	1.00000	1.00000	1.00000
Cantidad de He /(mol)	0.00210	0.00209	0.00205
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.00000	0.00000	0.00000
Gas en vacuum box /(mol)	0.0091	0.00578	0.00627
Fracción de He /(adim)	1.0000	1.00000	1.00000
Cantidad de He /(mol)	0.0091	0.00578	0.00627
Cantidad de CO ₂ /(mol)	0.0000	0.00000	0.00000
Cantidad total de He /(mol)	0.0112	0.00787	0.00831

Cantidad total de CO ₂ /(mol)	0.0000	0.00000	0.00000
Cantidad total /(mol)	0.0112	0.00787	0.00831
Condiciones finales			
Gas en reactor /(mol)	0.000350	0.000253	0.000268
Gas en vacuum box /(mol)	0.011493	0.008273	0.008798
Cantidad total de gas /(mol)	0.011843	0.008526	0.009066
Cantidad de gas producido /(mol)	0.000677	0.000652	0.000751
Cantidad de He /(mol)	0.011166	0.007873	0.008314
Fracción de He /(adim)	0.942829	0.923505	0.917129
Volumen de gas producido /(mL)	63.10	84.43	91.47
Balance de carbono			
Carbono inicial /(g)	0.0163	0.0163	0.0163
Carbono en gas producido /(g)	0.0078	0.0076	0.0091
Carbono en <i>biochar</i> /(g)	0.0068	0.0073	0.0075
%	90%	92%	102%

C. MUESTRA DE CÁLCULO

C.1. Cálculo del porcentaje de hemicelulosa presente en el rastrojo de piña

Para el cálculo de la hemicelulosa se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Hemicelulosa} = \text{FDN} - \text{FDA} \quad \text{C.1}$$

Utilizando los datos del Cuadro A.79:

$$\text{Hemicelulosa} = 53.4 - 33.3$$

$$\text{Hemicelulosa} = 20.1 \%$$

Resultado que se encuentra en el Cuadro 6.1.

C.2. Cálculo del porcentaje de celulosa presente en el rastrojo de piña

Para el cálculo de la celulosa se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Celulosa} = \text{FDA} - \text{lignina} \quad \text{C.2}$$

Utilizando los datos del Cuadro A.79:

$$\text{Celulosa} = 33.3 - 2.6$$

$$\text{Celulosa} = 30.7 \%$$

Resultado que se encuentra en el Cuadro 6.1.

C.3. Cálculo del porcentaje de pérdida de masa para la determinación de materia volátil

Para el cálculo de la pérdida de masa se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Pérdida de masa} = \frac{m_i - m_f}{m_i - m_c} \times 100 \quad \text{C.3}$$

Utilizando los datos del Cuadro A.78 en la columna 2, fila 3:

$$\text{Pérdida de masa} = \frac{30.74 - 29.94}{30.74 - 29.87} \times 100$$

$$\text{Pérdida de masa} = 91.9 \%$$

Resultado que se encuentra en el Cuadro A.78 en la columna 4, fila 2.

C.4. Cálculo de la materia volátil

Para el cálculo de la materia volátil se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{MV} = \text{Pérdida de masa} - \text{H} \quad \text{C.4}$$

Utilizando los datos del Cuadro A.78:

$$\text{MV} = 91.89 \% - 8,40\%$$

$$\text{MV} = 83,49 \%$$

Lo cual se realizó para los 3 valores de pérdida de masa del Cuadro A.78 y el promedio de dichos valores se encuentra en el Cuadro 6.4 en la fila 2 y columna 2.

C.5. Cálculo de la humedad del rastrojo de piña

Para el cálculo de la humedad se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{H} = \frac{m_i - m_f}{m_i - m_c} \times 100 \quad \text{C.5}$$

Utilizando los datos del Cuadro A.77:

$$\text{H} = \frac{11.622 - 11.613}{11.622 - 11.526} \times 100$$

$$\text{H} = 9,4 \%$$

Lo cual se realizó para los 3 sets de datos del Cuadro A.77 y el promedio de dichos valores se encuentra en el Cuadro 6.4 en la fila 3 y columna 2.

C.6. Cálculo de promedio

Para el cálculo de los promedios se utilizó la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{C.6}$$

Utilizando los datos del Cuadro A.80, filas 2, 3 y 4, columna 2:

$$\bar{X} = \frac{0.000214 + 0.000204 + 0.000160}{3}$$

$$\bar{X} = 0.000193$$

Ese resultado se encuentra en el Cuadro 6.13, columna 2, fila 2.

C.7. Cálculo de desviación estándar

Para el cálculo de los promedios se utilizó la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad \text{C.7}$$

Utilizando los datos del Cuadro A.80, filas 2,3 y 4, columna 2 y del Cuadro 6.13, fila 3 y columna 2:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(0.000214 - 0.000193)^2 + (0.000204 - 0.000193)^2 + (0.000160 - 0.000193)^2}{3}}$$

$$\sigma = 0.000029$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro 6.13, fila 4, columna 2.

C.8. Cálculo de los efectos e interacciones del análisis estadístico

Para el cálculo de los promedios se utilizó la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sum Y_{pos}}{4} - \frac{\sum Y_{neg}}{4} \quad \text{C.8}$$

Utilizando los datos del Cuadro B.81, filas de la 2 a la 9, columna 4:

$$E_A = \frac{0.000226 + 0.000341 + 0.000115 + 0.000184}{4} - \frac{0.000183 + 0.000226 + 0.000174 + 0.000199}{4}$$

$$E_A = 0.000021$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro B.82, fila 2, columna 4.

C.9. Cálculo de s_y^2

Para el cálculo de s_y^2 se utilizó la siguiente ecuación:

$$s_y^2 = (p - 1) \times \frac{\sum S_y^2}{k(p - 1)} \quad \text{C.9}$$

Utilizando los datos del Cuadro B.81, filas de la 2 a la 9, columna 5:

$$s_y^2 = (2 - 1) \frac{2.49 \times 10^{-9} + 3.25 \times 10^{-9} + 3.69 \times 10^{-9} + 2.97 \times 10^{-10} + 1.24 \times 10^{-13} + 2.49 \times 10^{-11} + 1.41 \times 10^{-9}}{2(2 - 1)}$$

$$s_y^2 = 1.60 \times 10^{-9}$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro B.88, fila 2, columna 2.

C.10. Cálculo de s_E^2

Para el cálculo de s_E^2 se utilizó la siguiente ecuación:

$$s_E^2 = \frac{4}{N} \times s_y^2 \quad \text{C.10}$$

Utilizando los datos del Cuadro B.88, fila 2, columna 2:

$$s_E^2 = \frac{4}{16} \times 1.60 \times 10^{-9}$$

$$s_E^2 = 3.99 \times 10^{-10}$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro B.88, fila 3, columna 2.

C.11. Cálculo de s_E^2

Para el cálculo de s_E^2 se utilizó la siguiente ecuación:

$$s_E = \sqrt{s_E^2} \quad \text{C.11}$$

Utilizando los datos del Cuadro B.88, fila 3, columna 2:

$$s_E = \sqrt{3.99 \times 10^{-10}}$$

$$s_E = 2.00 \times 10^{-5}$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro B.88, fila 4, columna 2.

C.12. Cálculo del intervalo de no significancia

Para el cálculo del intervalo de no significancia se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Intervalo} = \pm(s_E \times t_{0.05,8}) \quad \text{C.12}$$

Utilizando los datos del Cuadro B.88, fila 4, columna 2:

$$\text{Intervalo} = \pm(2.00 \times 10^{-5} \times 2.306)$$

$$\text{Intervalo} = \pm 0.000046$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro B.89, fila 2 y 3, columna 2.

C.13. Cálculo del coeficiente de variación

Para el cálculo del coeficiente de variación se utilizó la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{\bar{X}}{\sigma} \times 100 \quad \text{C.13}$$

Utilizando los datos del Cuadro 6.13, fila 2 y 3, columna 2:

$$CV = \frac{0.000193}{0.000029} \times 100$$

$$CV = 14.8 \%$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro 6.14, fila 3, columna 2.

C.14. Cálculo del estadístico de prueba t_c para las corridas de validación

Para el cálculo del t_c se utilizó la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad \text{C.14}$$

Utilizando los datos del Cuadro 6.13, fila 2 y 3, columna 2:

$$t_c = \frac{0.000195 - 0.0001829}{\frac{0.000029}{\sqrt{3}}}$$

$$t_c = 0.585$$

Este resultado se encuentra en el **Cuadro 6.15**, fila 3, columna 2.

C.15. Cálculo del gas en el reactor

Para el cálculo del gas en el reactor se utilizó la siguiente ecuación:

$$n = \frac{PV}{RT} \quad \text{C.15}$$

Utilizando los datos del Cuadro A.20 , fila 3, columna 5 y el Cuadro A.39, fila 3 y columna 3:

$$n = \frac{14.988 \text{ psi} \times 50.707 \text{ mL}}{1205.92 \frac{\text{psi mL}}{\text{mol K}} \times 305.35 \text{ K}}$$

$$n = 0.00206 \text{ mol}$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro B.90, fila 3, columna 2. Se hace de igual forma para el gas en la vacuum box, tanto en las condiciones iniciales como finales.

C.16. Cálculo del gas producido

Para el cálculo del gas en el reactor se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad gas producido} = \text{Total final} - \text{Total inicial} \quad \text{C.16}$$

Utilizando los datos del Cuadro B.90, fila 13 y 17, columna 2:

$$\text{Cantidad gas producido} = 0.00730 - 0.00682$$

$$\text{Cantidad gas producido} = 0.000490$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro B.90, fila 18

C.17. Cálculo del balance de carbono

Para el cálculo del gas en el reactor se utilizó la siguiente ecuación:

$$BC = \frac{C_{\text{gas producido}} + C_{\text{biochar}}}{C_{\text{inicial}}} \times 100 \quad \text{C.17}$$

Utilizando los datos del Cuadro B.90, fila 23, 24 y 25, columna 2:

$$BC = \frac{0.00594 + 0.00724}{0.01623} \times 100$$

$$BC = 81 \%$$

Este resultado se encuentra en el Cuadro B.90, fila 26, columna 2.

ANEXOS

Anexo 1. Cromatogramas FID y TCD de las corridas experimentales

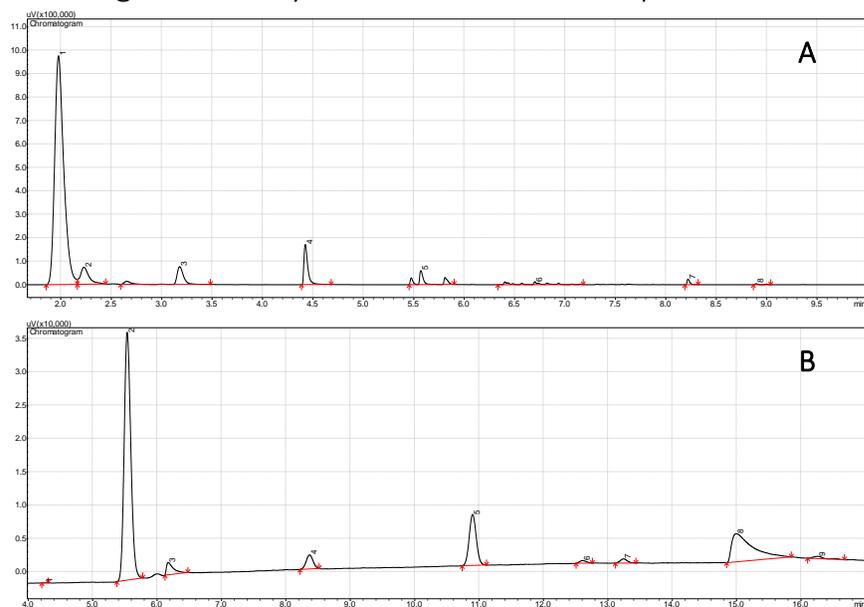


Figura A. 1. Cromatogramas para DOE1 A) FID B) TCD

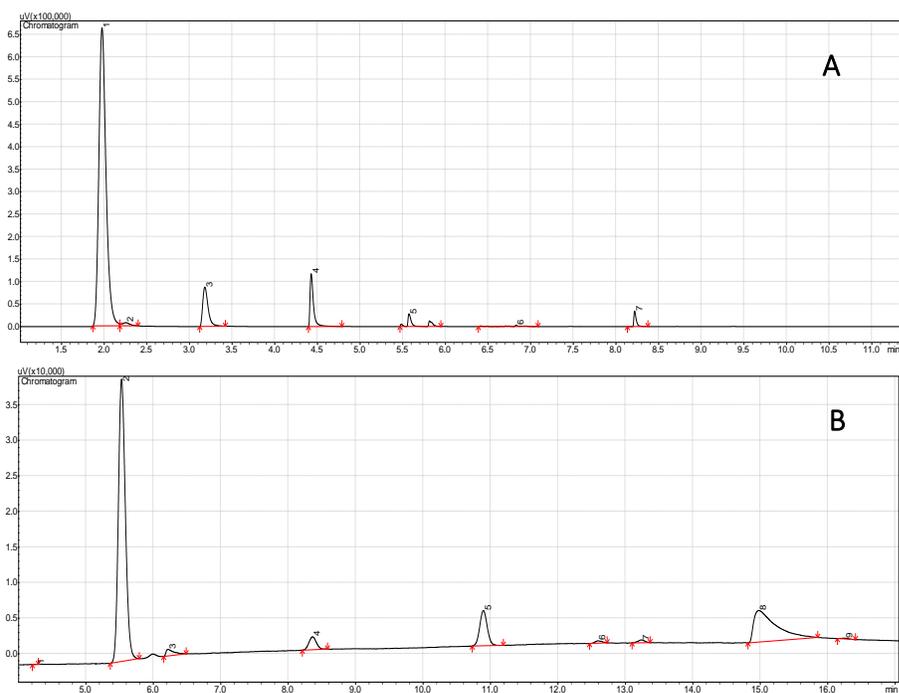


Figura A. 2. Cromatogramas para DOE2 A) FID B) TCD

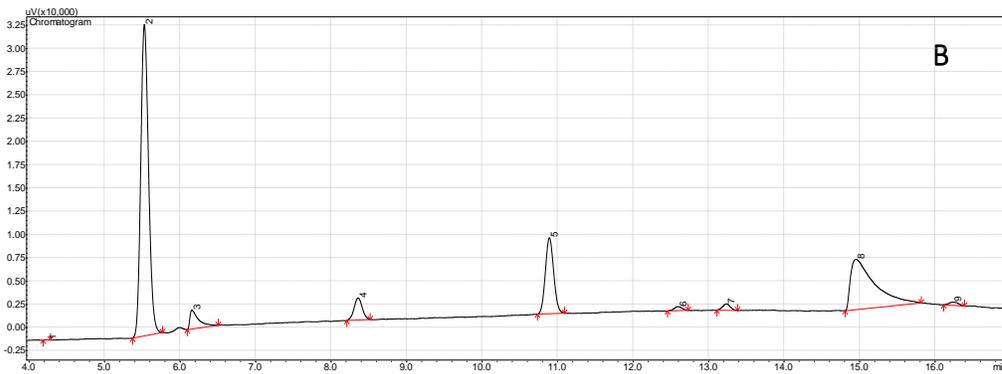
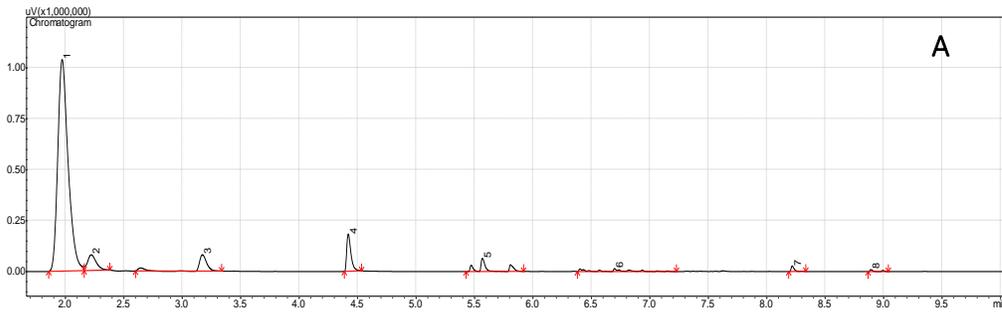


Figura A. 3. Cromatogramas para DOE3 A) FID B) TCD

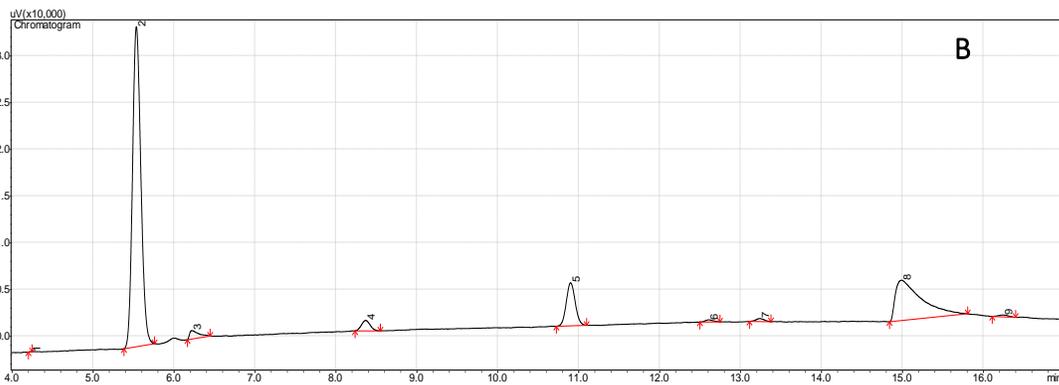
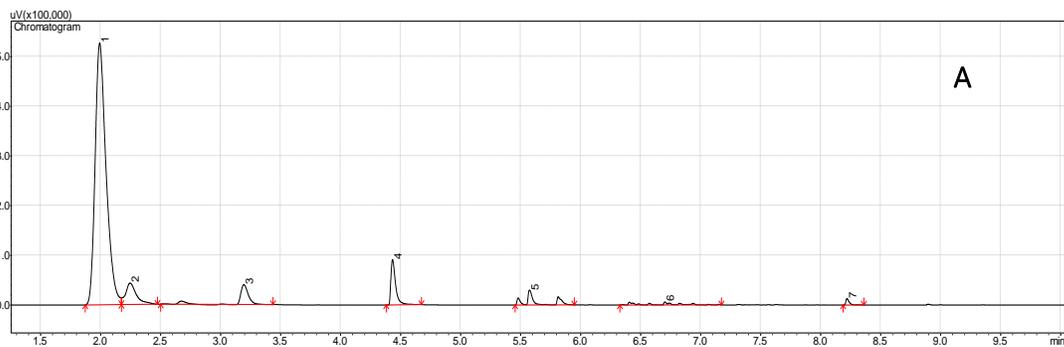


Figura A. 4. Cromatogramas para DOE8 A) FID B) TCD

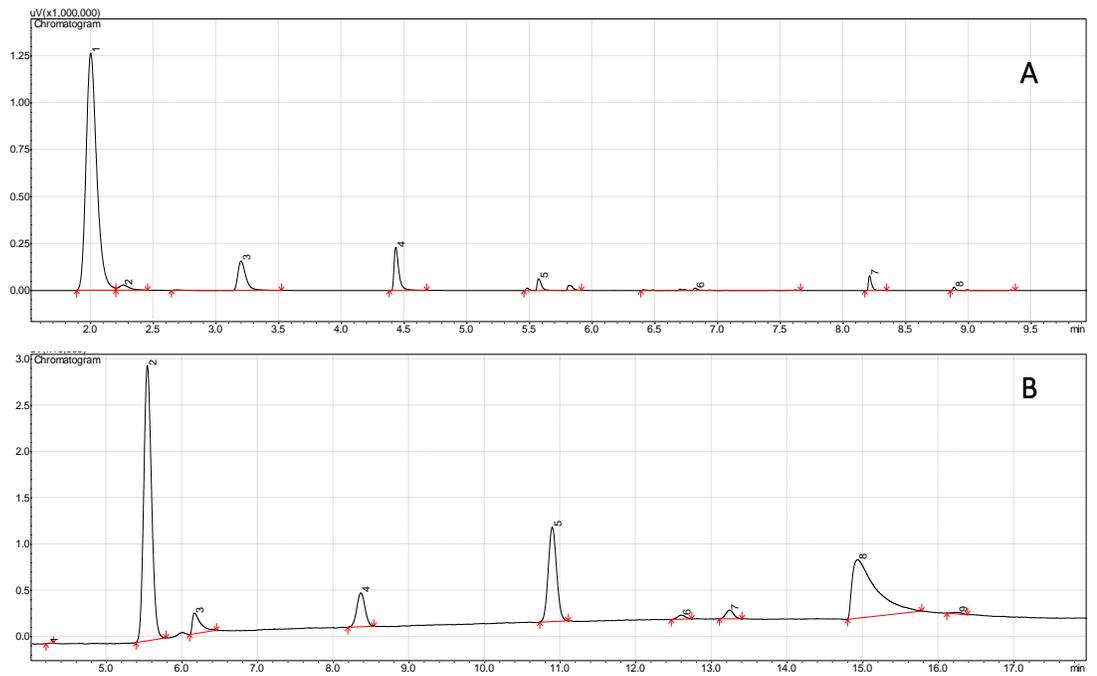


Figura A. 5. Cromatogramas para DOE9 A) FID B) TCD

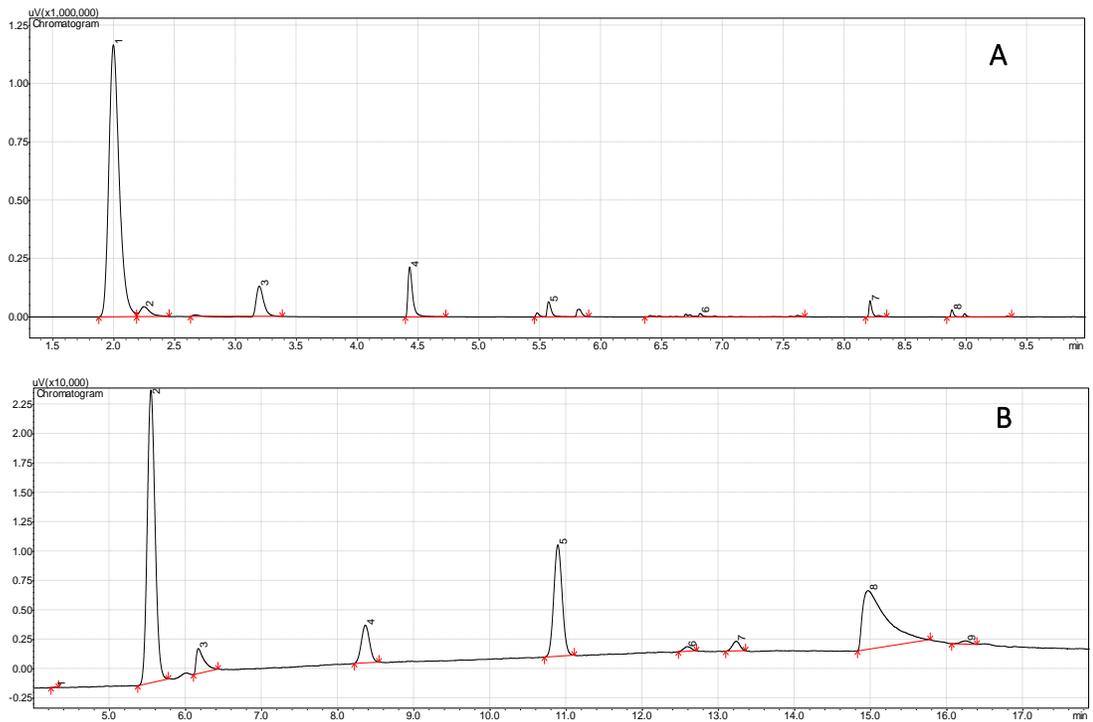


Figura A. 6. Cromatogramas para DOE11 A) FID B) TCD

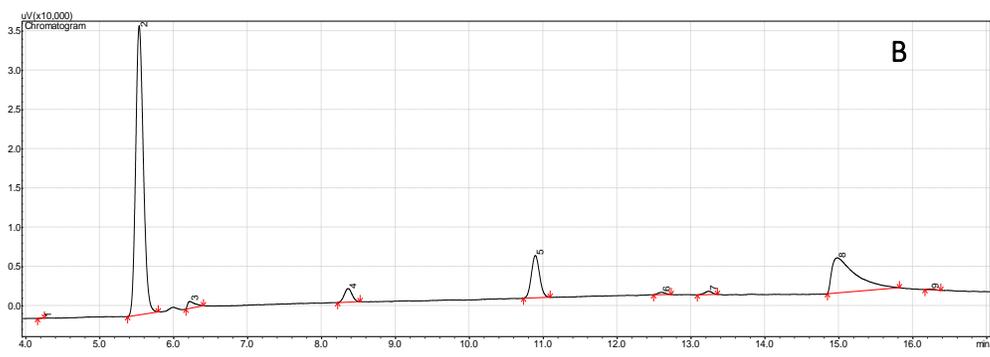
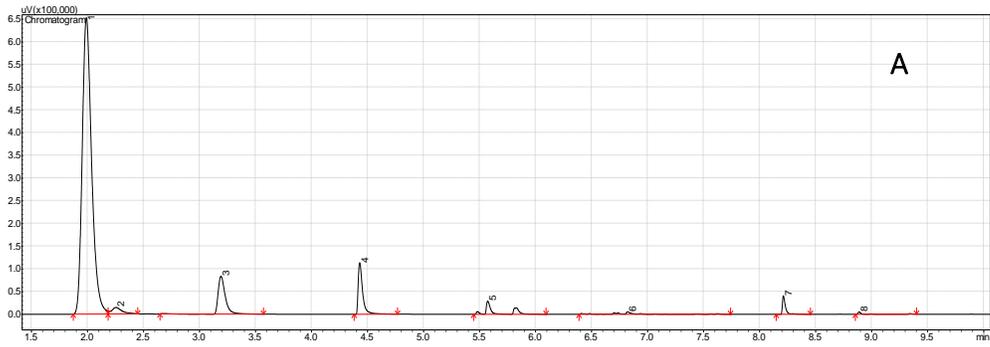


Figura A. 7. Cromatogramas para DOE12 A) FID B) TCD

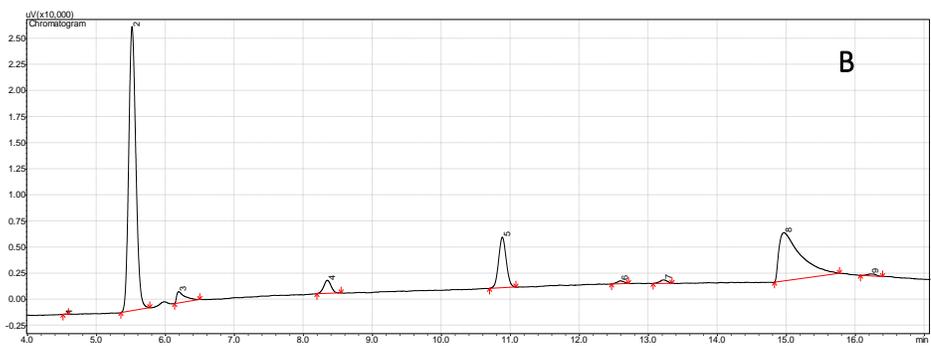
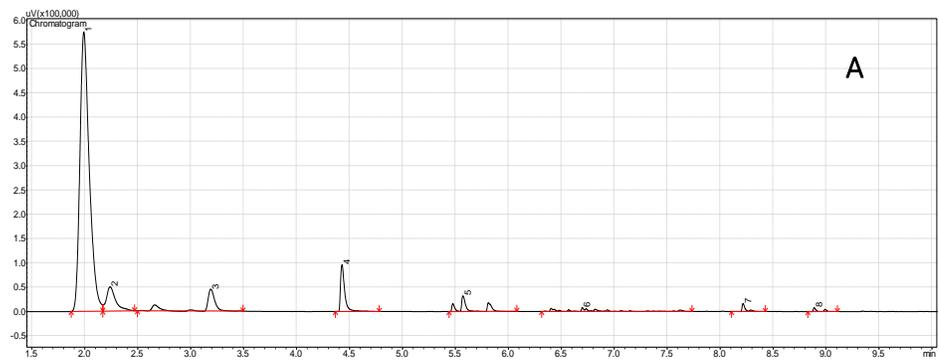


Figura A. 8. Cromatogramas para DOE16 A) FID B) TCD

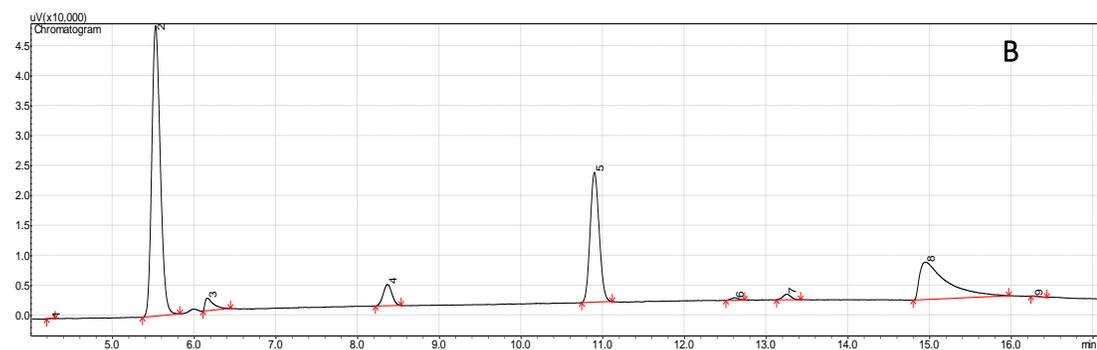
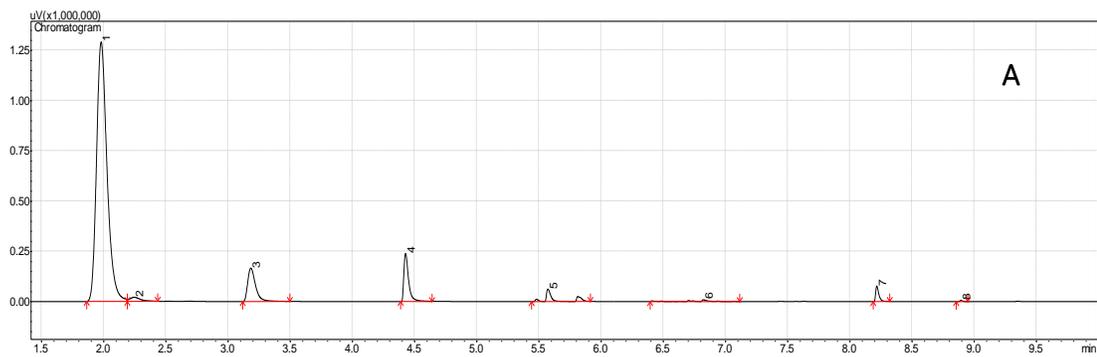


Figura A. 9. Cromatogramas para DOE4 A) FID B) TCD

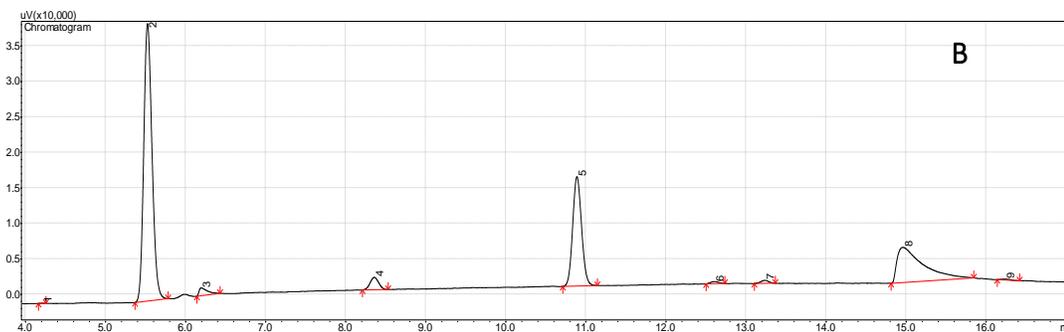
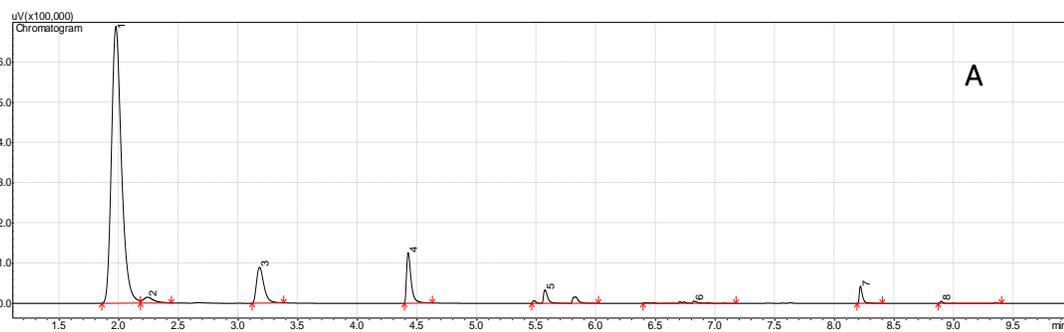


Figura A. 10. Cromatogramas para DOE5 A) FID B) TCD

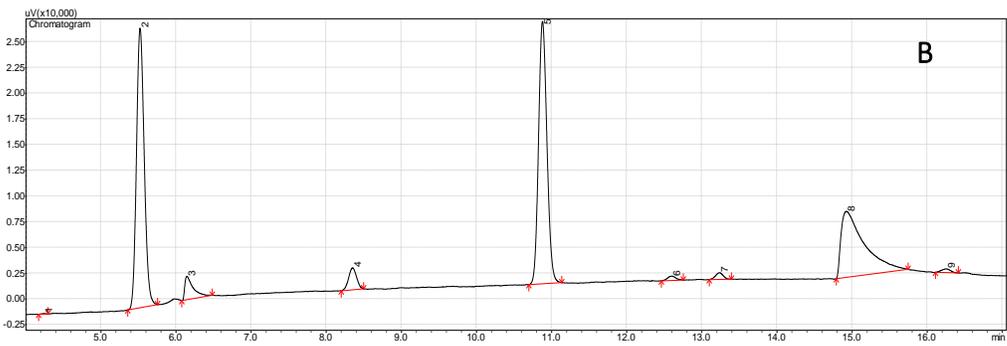
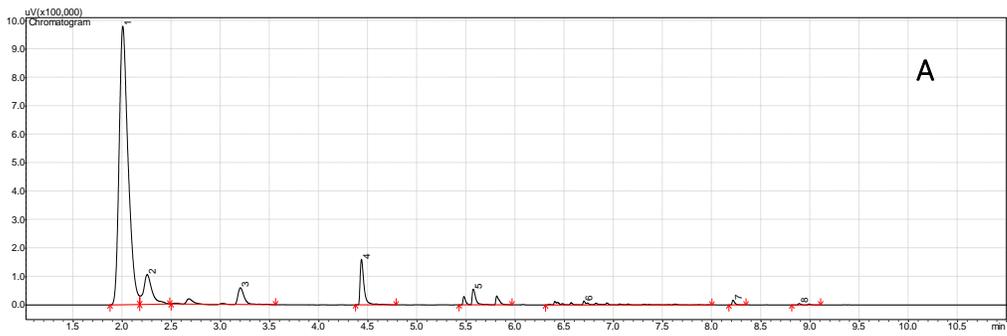


Figura A. 11. Cromatogramas para DOE6 A) FID B) TCD

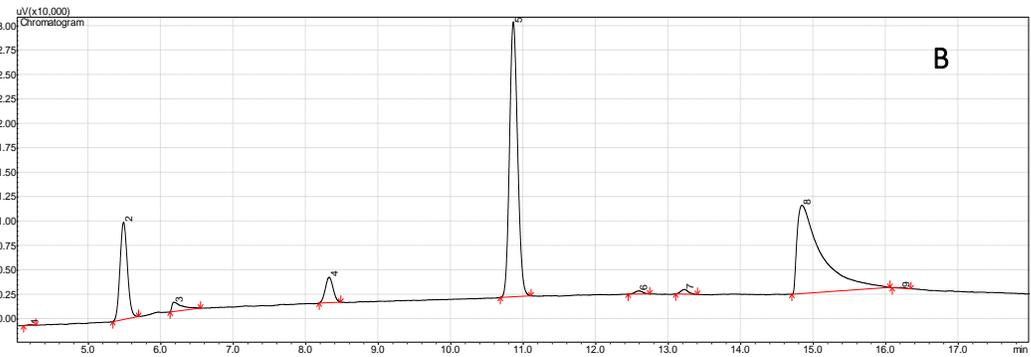
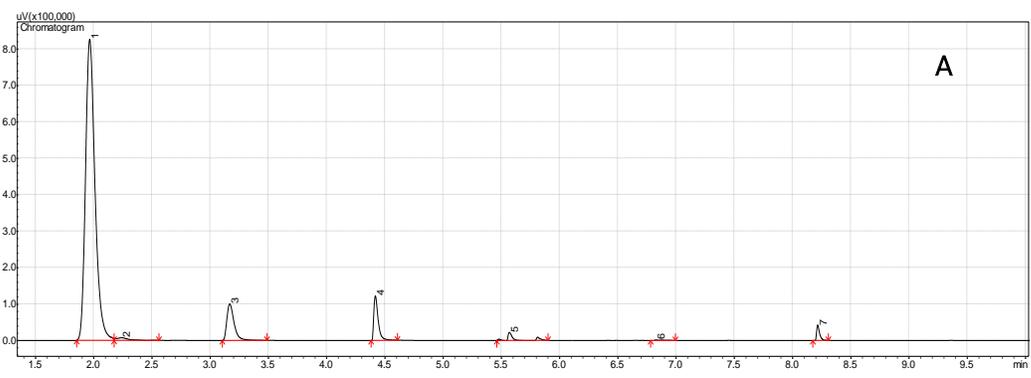


Figura A. 12. Cromatogramas para DOE7 A) FID B) TCD

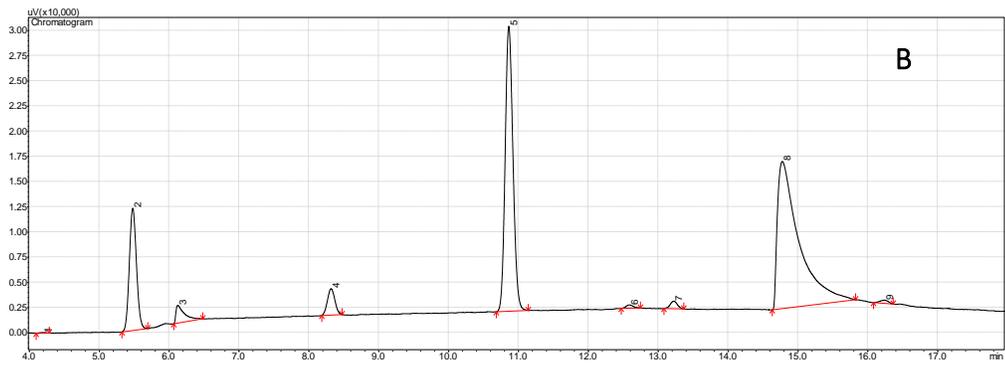
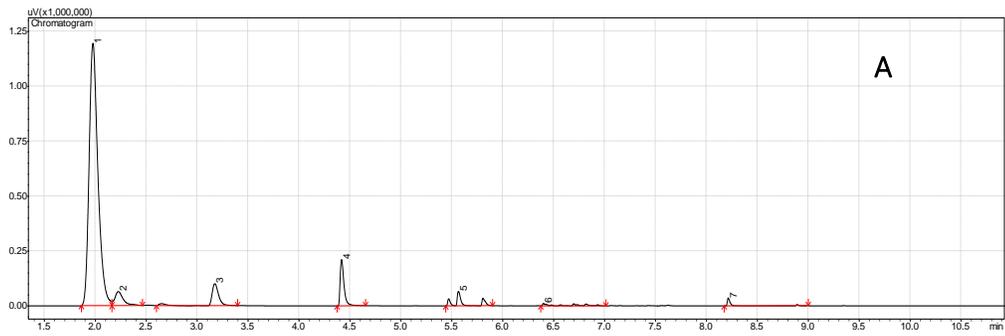


Figura A. 13. Cromatogramas para DOE10 A) FID B) TCD

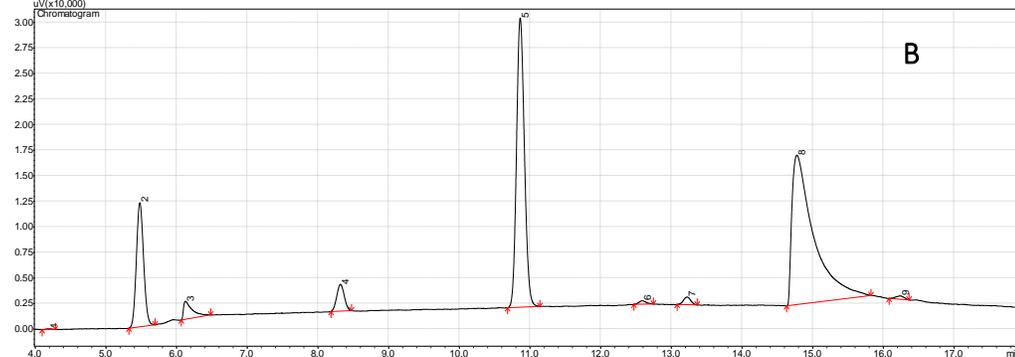
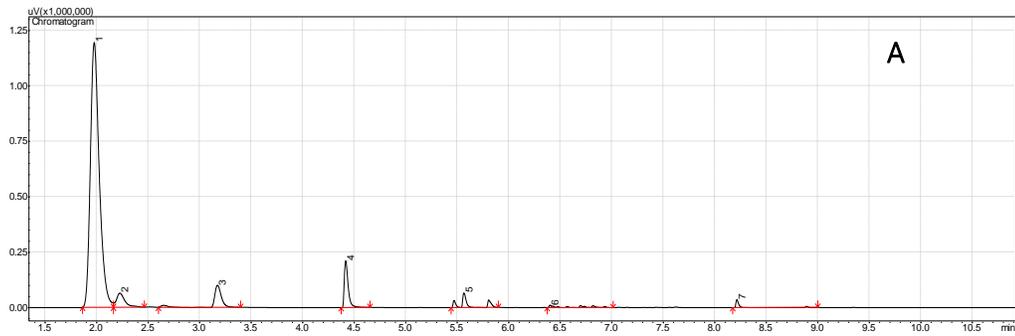


Figura A. 14. Cromatogramas para DOE13 A) FID B) TCD

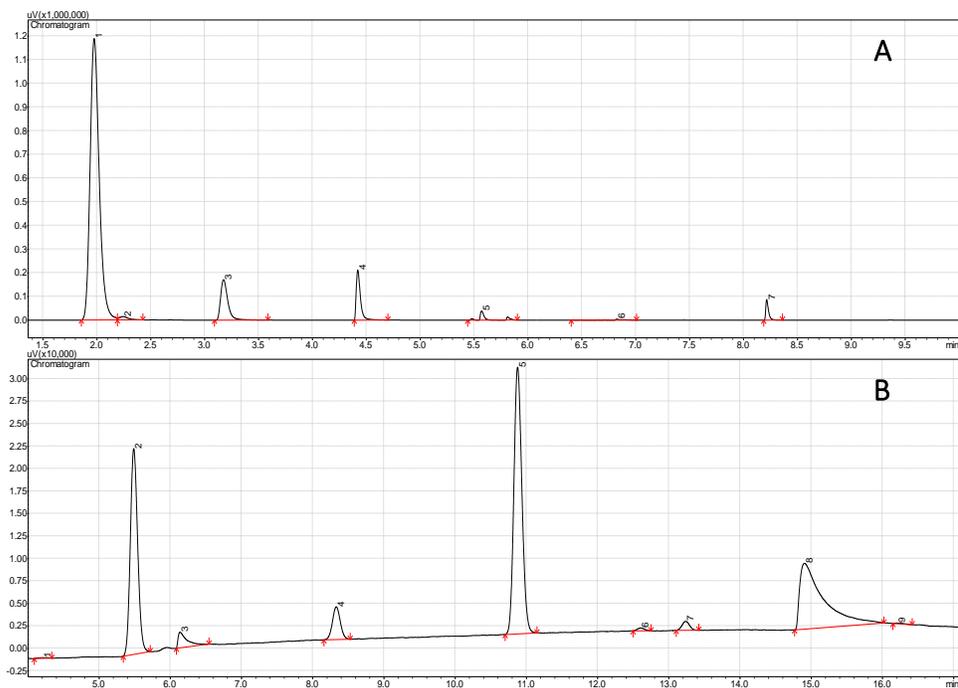


Figura A. 15. Cromatogramas para DOE14 A) FID B) TCD

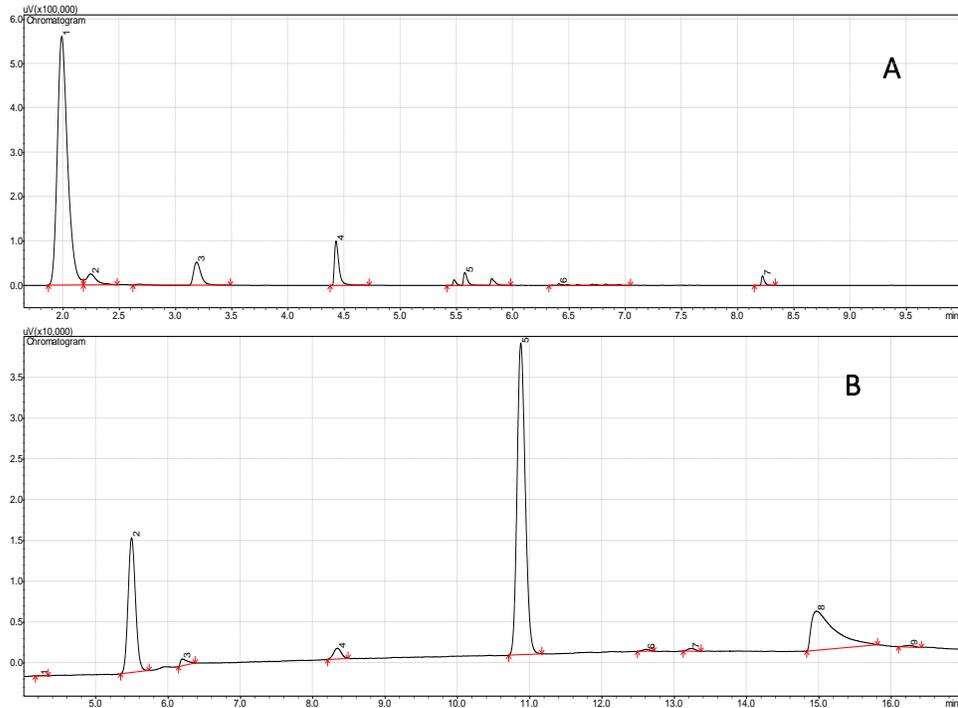


Figura A.16. Cromatogramas para DOE15 A) FID B) TCD

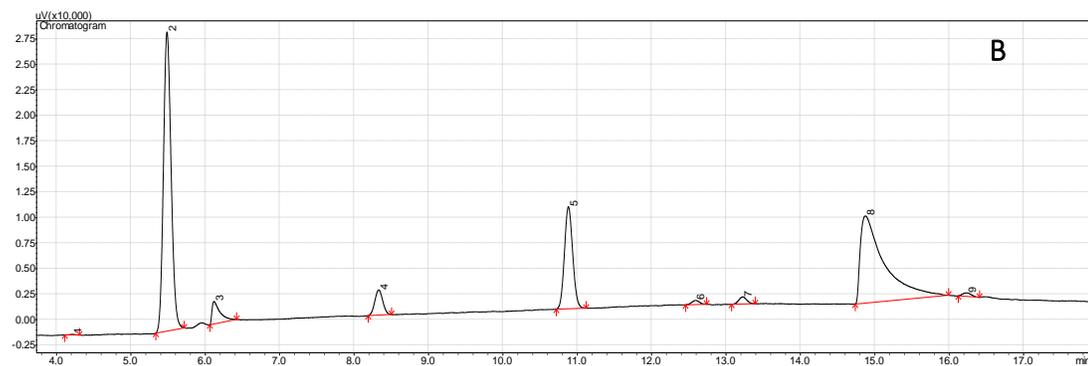
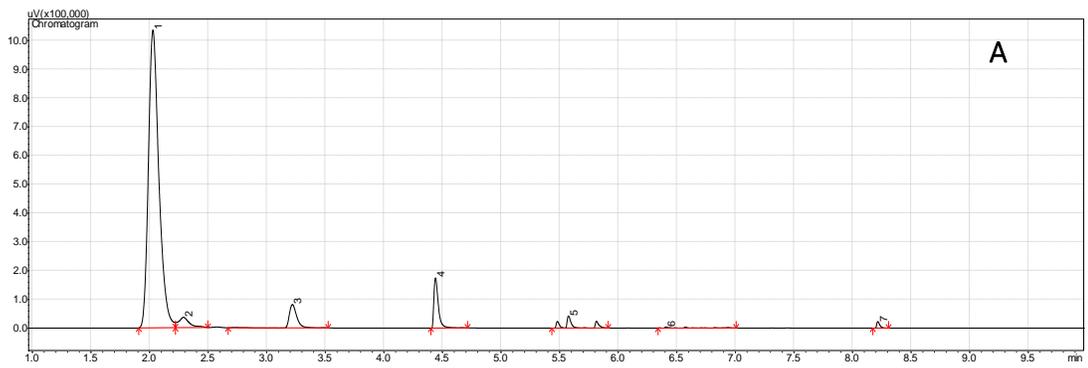


Figura A. 17. Cromatogramas para Val1 A) FID B) TCD

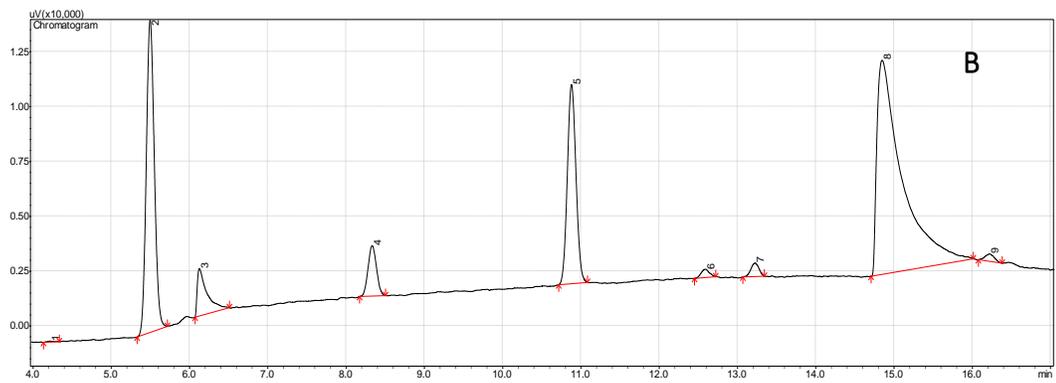
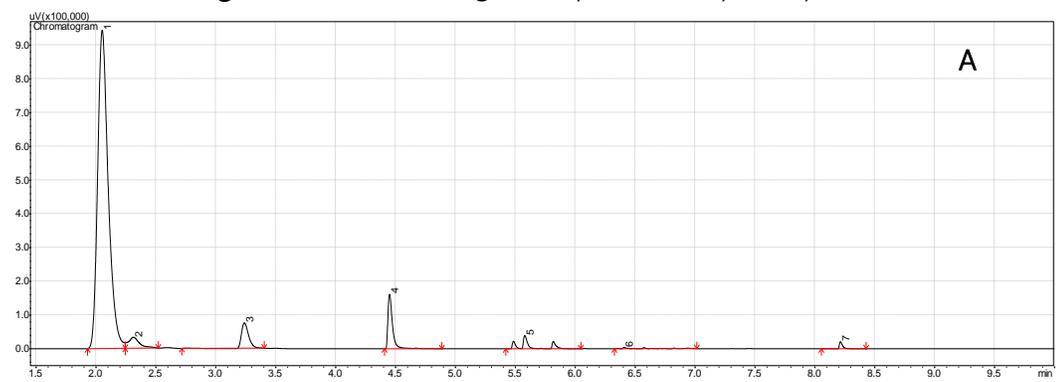


Figura A. 18. Cromatogramas para Val2 A) FID B) TCD

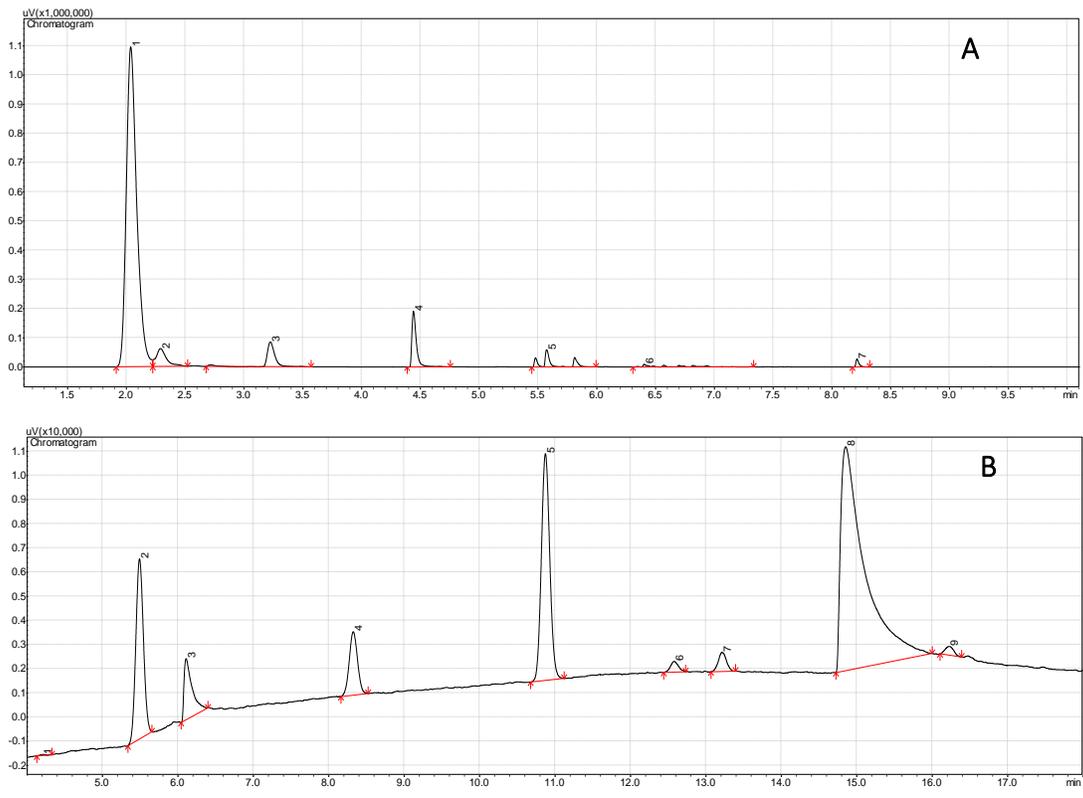


Figura A. 19. Cromatogramas para Val3 A) FID B) TCD

Anexo 2. Gráficos de efectos estandarizados

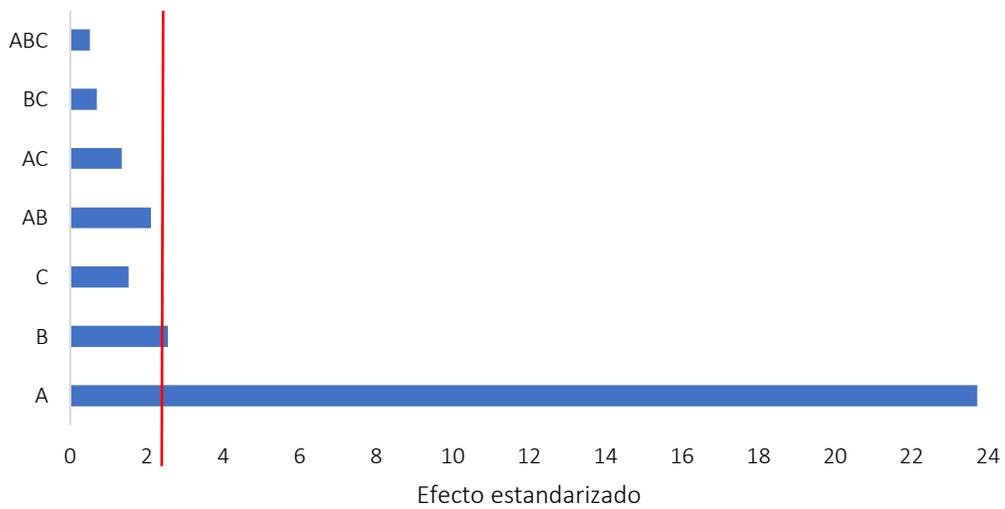


Figura B. 1. Gráfico de efectos estandarizados para el dióxido de carbono

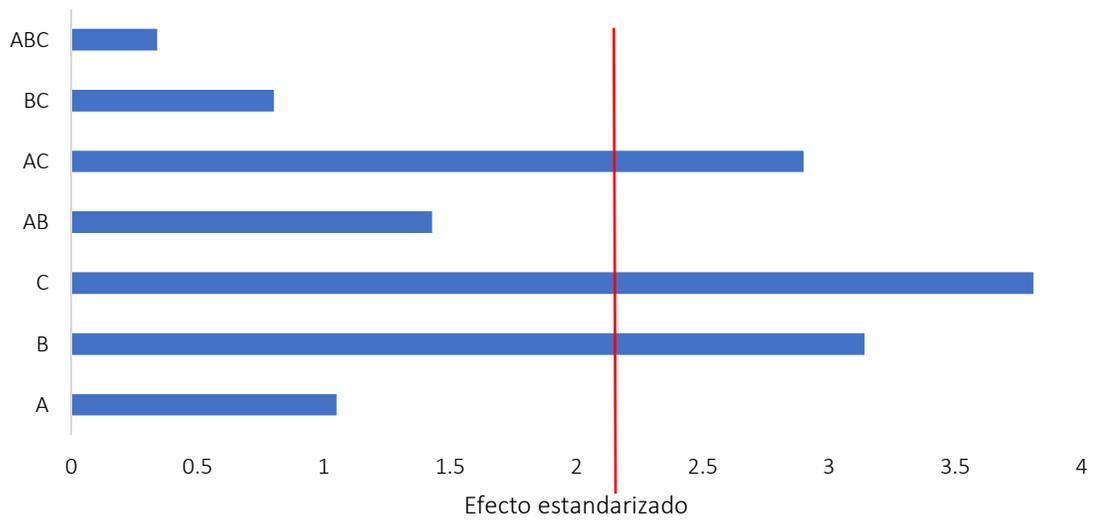


Figura B. 2. Gráfico de efectos estandarizados para el hidrógeno

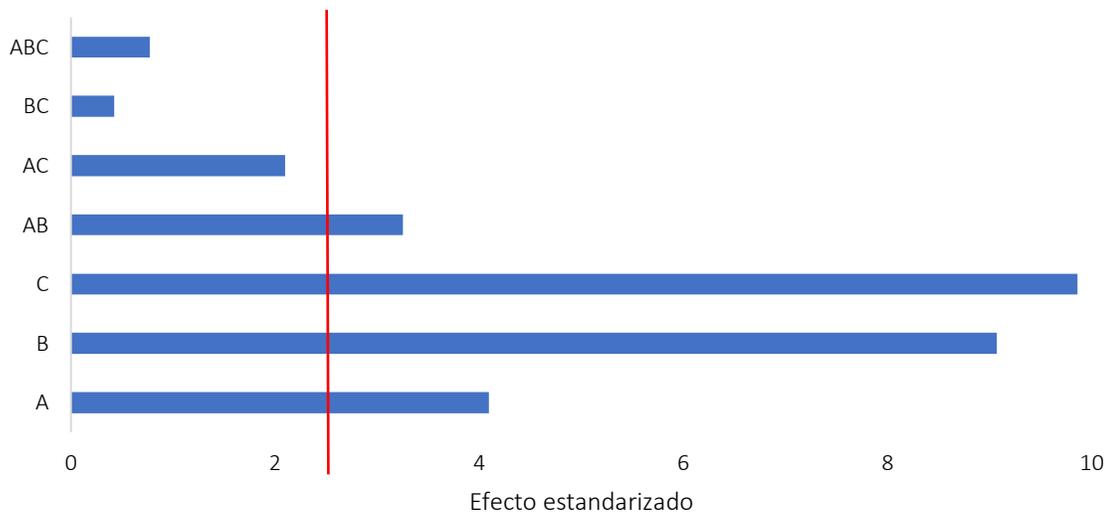


Figura B. 3. Gráfico de efectos estandarizados para el metano

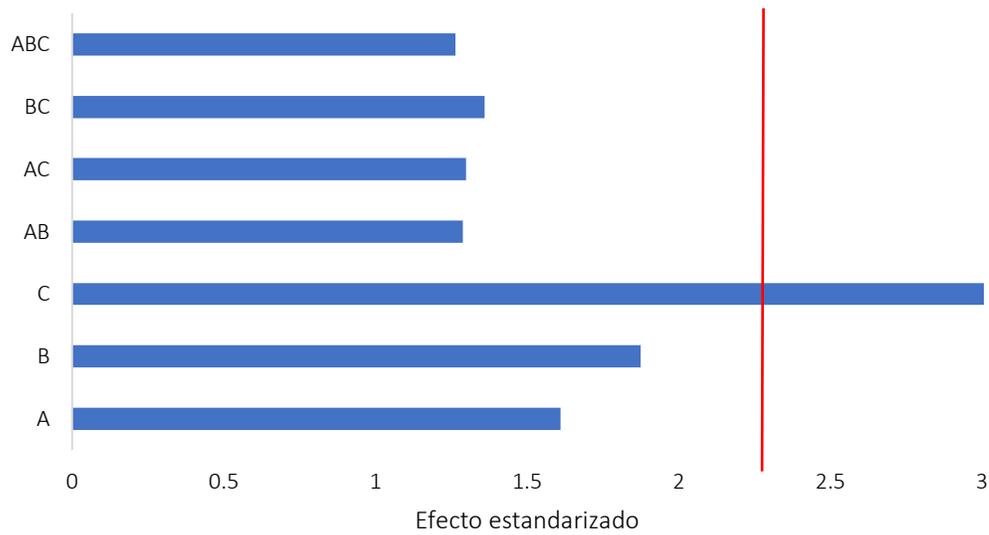
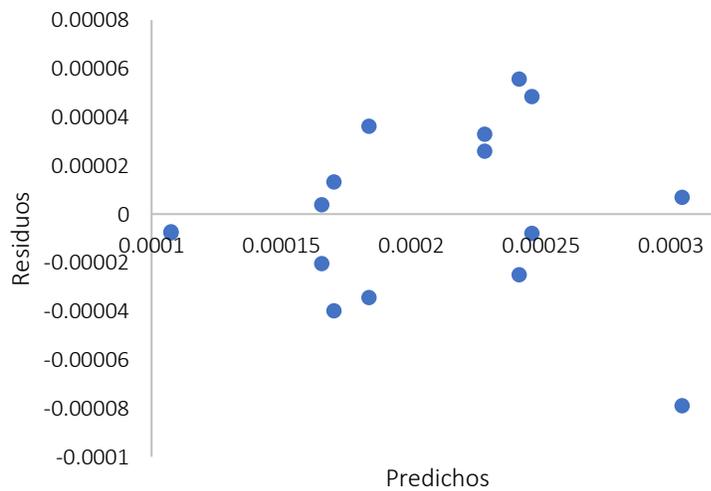


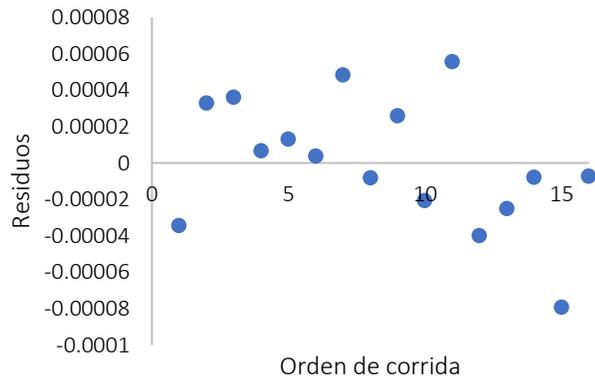
Figura B.3. Gráfico de efectos estandarizados para $g_{biochar}/g_{grastrojo}$

Anexo 3. Gráficos para la verificación de supuestos del análisis estadístico

A)



B)



C)

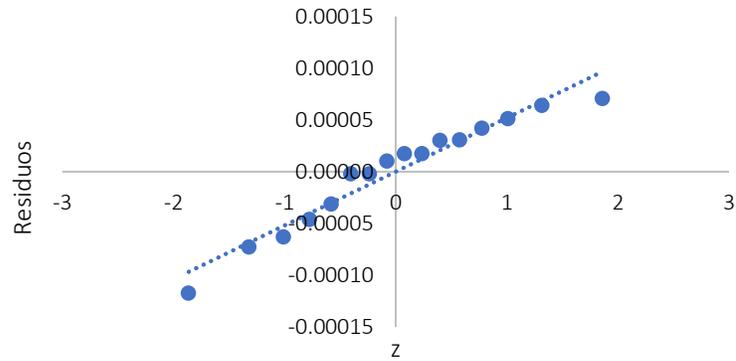
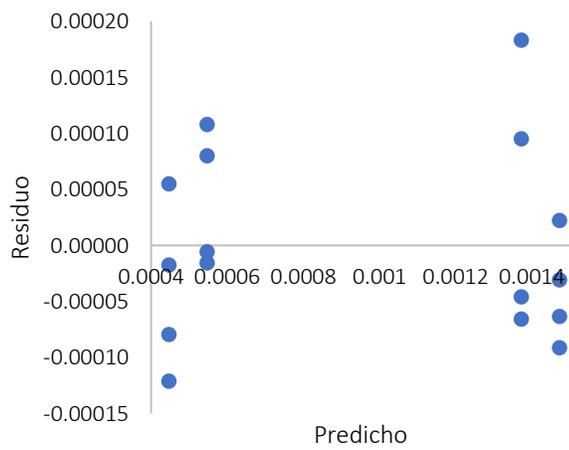
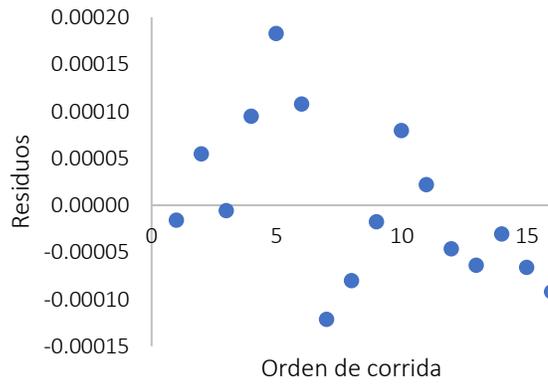


Figura C.1. Verificación de supuestos para el caso del hidrógeno A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad

A)



B)



C)

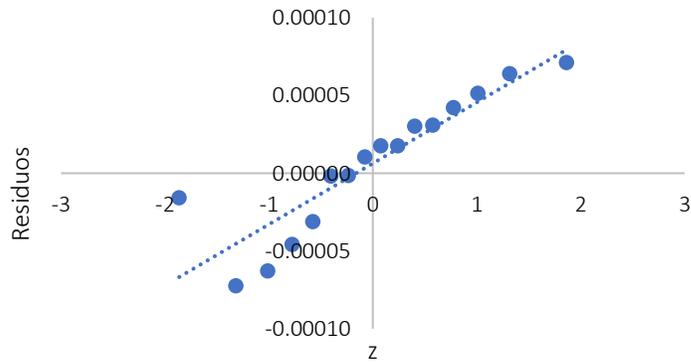
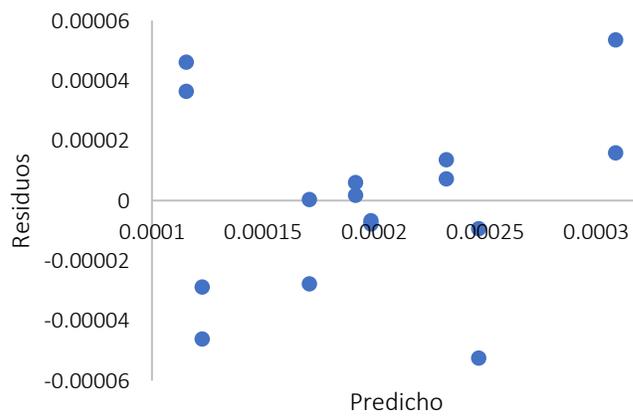
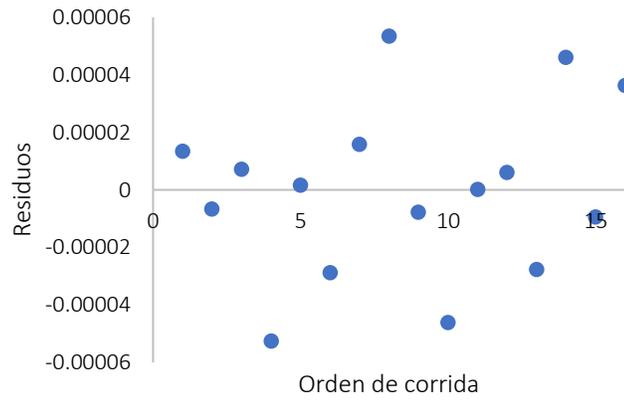


Figura C.2. Verificación de supuestos para el caso del dióxido de carbono A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad

A)



B)



C)

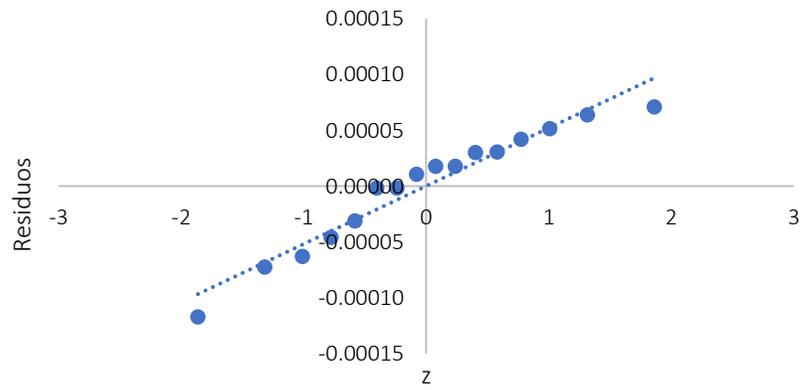
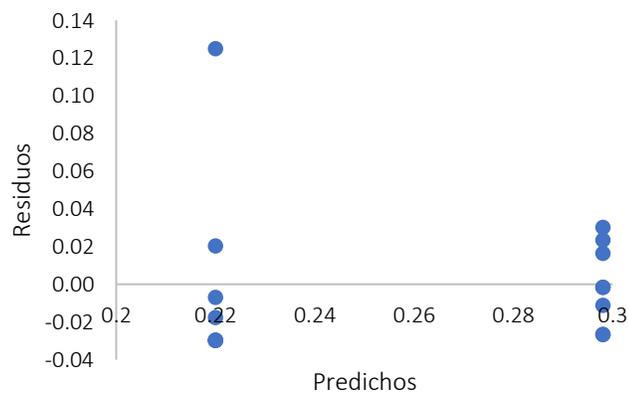
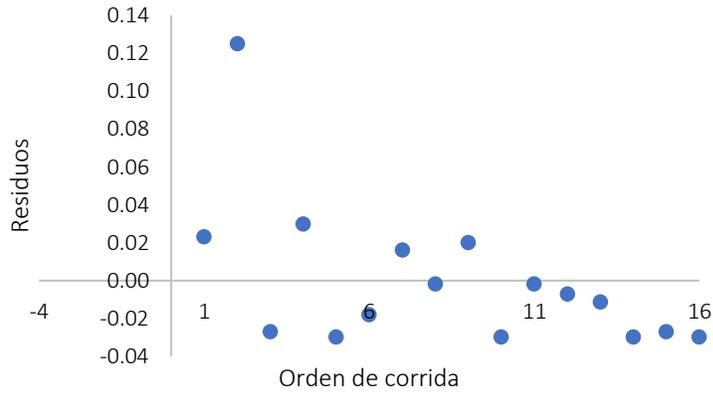


Figura C.3. Verificación de los supuestos para el caso de metano A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad

A)



B)



C)

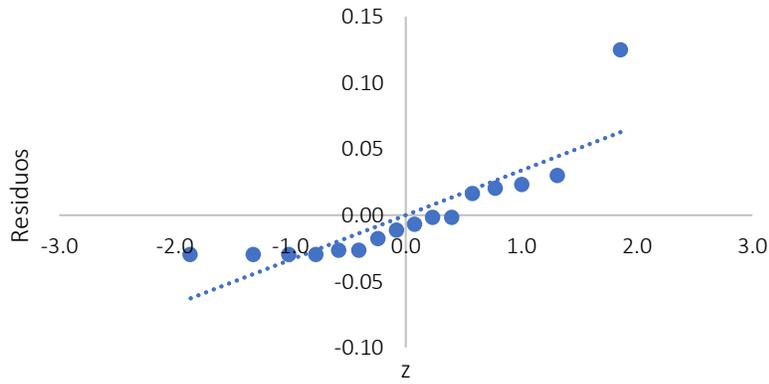


Figura C.4. Verificación de supuestos para el caso del *biochar* A) Varianza constante B) Aleatoriedad C) Normalidad

Anexo 4. Gráficos de interacción

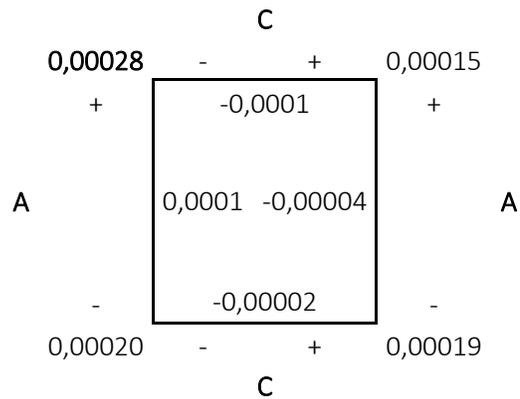


Figura D. 1. Análisis de la interacción AC para el hidrógeno

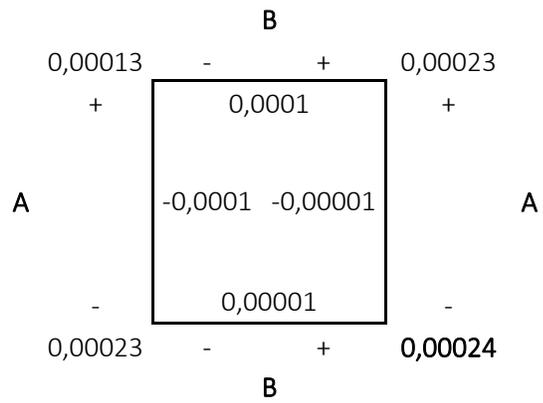


Figura D. 2. Análisis de la interacción AB para el metano

