

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA

PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA CAÑA
GUADUA (*Guadua angustifolia* K.) MEDIANTE ACTIVACIÓN
QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO

DIEGO XAVIER ANDRADE VARELA
(diego.dxavsdq@gmail.com)

DIRECTOR: ING. ERNESTO DE LA TORRE (Ph.D.)
(ernesto.delatorre@epn.edu.ec)

Quito, Enero 2016

© Escuela Politécnica Nacional (2015)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Diego Xavier Andrade Varela declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Diego Xavier Andrade Varela

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Xavier Andrade Varela bajo mi supervisión.

Ing. Ernesto de la Torre Chauvin. Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto (DEMEX-PIS 01-10), que se ejecutó en el Departamento de Metalurgia Extractiva.

AGRADECIMIENTOS

Las principales gracias son para mis papás, Doña Lourdes y Don Luchito, ustedes además de la vida me hicieron la persona que soy. Muchas gracias por darme y enseñarme todo lo necesario para poder afrontar mi vida de hoy en adelante. A mis hermanos, Dani, Jose y Juanpa que han sido el mejor ejemplo para mí durante mi crecimiento. A Geraldine, a la Dome y Mariæaliza por su apoyo y por darme esas tres chiquitas y lindas razones más para seguir adelante (Manú, Amaru y Lulu).

A Ernesto por su dedicada ayuda y guía durante este proyecto. A toda mi familia del DEMEX (Inge Alis, Inge Dianita, Eli, Dianita, Isaac, Eve, Doña Verito, Pauly y Don Kleverín) que siempre me brindaron su ayuda cuando la necesité. A mis amigos de tesis Michu, Ale, Anilú, Gato y Diego N que supieron apoyarme, ayudarme y aconsejarme. Gracias Faustito, que sin tu ayuda no hubiera podido iniciar este proyecto.

A mis amigos Stalin, Gabby y Katty, no pude haber tenido mejor compañía durante mi tiempo en la facultad, el mejor ejemplo de que la amistad no debe ser perfecta sino solo verdadera. Cari, Katty C, Cris, July, Cadena y Tefi, nunca me faltó con ustedes una sonrisa, una ayuda y una palabra de aliento. A todos mis compañeros del Atlético Durán y demás compañeros de ruta. Muchísimas gracias Majo, gracias por la vida compartida todos estos años y por todo lo que hiciste por mí, me faltará vida para agradecerte todo eso.

A todos mis profesores que de alguna manera me hicieron darme cuenta que no me equivoqué al escoger este camino de la Ingeniería Química. Y gracias a la vida que me cruzó en mi camino a toda la gente maravillosa que acabo de nombrar.

DEDICATORIA

A Cecilia Alejandrina Bustos Veintimilla

A la tía Ceci

A mi Shishi

A mi ángel en el cielo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	XIV
INTRODUCCIÓN	XVI
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Propiedades físicas y químicas de la caña guagua (<i>Guadua Angustifolia</i> K.)	1
1.1.1. Morfología y estructura anatómica de la caña guagua	2
1.1.1.1. Morfología de la caña guagua	2
1.1.1.2. Anatomía de la caña guagua	4
1.1.2. Propiedades físicas de la caña guagua	6
1.1.3. Propiedades químicas de la caña guagua	8
1.2. Carbonización de materiales lignocelulósicos	9
1.2.1. Materiales lignocelulósicos	9
1.2.1.1. Celulosa	11
1.2.1.2. Hemicelulosa	11
1.2.1.3. Lignina	12
1.2.2. Carbonización de materiales lignocelulósicos	14
1.2.3. Cinética de las reacciones de carbonización de la biomasa	18
1.2.4. Determinación de la composición inicial del material lignocelulósico	20
1.3. Activación química con KOH	22
1.3.1. Carbón activado	22
1.3.1.1. Procesos de activación física de carbón	23
1.3.1.2. Procesos de activación química del carbón	25
1.3.2. Mecanismo de activación química con hidróxido de potasio	26
1.3.2.1. Química de la activación con KOH	29
1.3.2.2. Efecto de la relación g KOH/ g Carbón en la activación química	31
1.3.2.3. Efecto de la temperatura en la activación química	33
1.3.2.4. Efecto del tiempo en la activación química	36
2. PARTE EXPERIMENTAL	37
2.1. Caracterización física y química de la caña guagua proveniente de la zona de Nanegal, provincia de Pichincha	37
2.1.1. Caracterización física de la caña guagua	37
2.1.1.1. Determinación de humedad	37
2.1.1.2. Determinación del contenido de material volátil	38
2.1.1.3. Determinación del contenido de carbón fijo y cenizas	38
2.1.1.4. Determinación de la densidad aparente y real de la caña guagua	39
2.1.1.5. Determinación del ángulo de reposo de la caña guagua	40

2.1.2. Caracterización química de la caña guadua	40
2.1.2.1. Análisis termogravimétrico de la caña guadua	41
2.1.2.2. Determinación de la presencia de metales en la caña guadua	41
2.1.2.3. Caracterización de la estructura de la caña guadua	42
2.2. Evaluación de parámetros para la carbonización de la caña guadua	42
2.2.1. Pruebas a escala laboratorio para la carbonización de la caña guadua	42
2.2.2. Prueba a escala piloto para la carbonización de la caña guadua	43
2.3. Evaluación de los parámetros para la activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua	46
2.3.1. Pruebas a escala laboratorio para la activación química con hidroxido de potasio del carbón de la caña guadua	47
2.3.2. Determinación del índice de yodo	47
2.3.3. Pruebas a escala piloto para la activación química con hidroxido de potasio del carbón de la caña guadua	48
2.3.3.1. Índice de azul de metileno	49
2.3.3.2. Decoloración de jarabe de azúcar	50
2.3.3.3. Caracterización de los grupos funcionales de superficie mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier	51
2.3.3.4. Determinación de la superficie específica, tamaño y volumen de poro del carbón activado a escala piloto	51
2.3.3.5. Caracterización de la estructura del carbón activado producido a escala piloto	51
2.4. Diseño de una planta para la producción de 10 t/mes de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química con hidróxido de potasio y evaluación de prefactibilidad económica.	52
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
3.1. Caracterización física y química de la caña guadua proveniente de la zona de Nanegal, provincia de Pichincha	55
3.1.1. Caracterización física de la caña guadua	56
3.1.1.1. Determinación de humedad	56
3.1.1.2. Determinación del contenido de material volátil, carbón fijo y cenizas	57
3.1.1.3. Determinación de la densidad aparente, densidad real y ángulo de reposo de la caña guadua	58
3.1.2. Caracterización química de la caña guadua	59
3.1.2.1. Análisis termogravimétrico	59
3.1.2.2. Determinación de la composición química de la caña guadua	61
3.1.2.3. Determinación de la presencia de metales en la caña guadua	66
3.1.2.4. Caracterización de la estructura de la caña guadua	67
3.2. Evaluación de los parámetros para la carbonización de la caña guadua	68

3.2.1. Pruebas a escala laboratorio para la carbonización de la caña guadua	68
3.2.1.1. Evaluación de la influencia de la temperatura en la carbonización de la caña guadua	69
3.2.1.2. Evaluación de la influencia del tiempo en la carbonización de la caña guadua	71
3.2.1.3. Análisis de rendimiento de carbonización de la caña guadua	75
3.2.2. Prueba a escala piloto para la carbonización de la caña guadua	76
3.2.2.1. Evaluación de la influencia de la agitación en la carbonización de la caña guadua a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff	76
3.2.2.2. Caracterización de la estructura del carbón producido a escala piloto	79
3.3. Evaluación de los parametros para la activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua	80
3.3.1. Pruebas a escala laboratorio para la activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua	81
3.3.1.1. Análisis de la influencia de la temperatura en la activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua	81
3.3.1.2. Análisis de la influencia del tiempo y de la relación g KOH/ g C.C.G. en la activación química del carbón de la caña guadua	82
3.3.2. Pruebas a escala piloto para la activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua	86
3.3.2.1. Índice de azul de metileno	88
3.3.2.2. Decoloración del jarabe de azúcar	89
3.3.2.3. Caracterización de los grupos funcionales de superficie mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier	90
3.3.2.4. Determinación de la superficie específica, tamaño y volumen de poro del carbón activado a escala piloto	91
3.3.2.5. Caracterización de la estructura del carbón activado producido a escala piloto	94
3.4. Diseño de una planta para la producción de 10 t/mes de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química con hidróxido de potasio y evaluación de prefactibilidad económica	96
3.4.1. Localización de la planta	97
3.4.2. Caracterización de materia prima, insumos, servicios industriales y producto terminado	97
3.4.2.1. Materia prima	98
3.4.2.2. Insumos	99
3.4.3. Diagramas BFD y PFD del proceso de producción de carbón activado a partir de la caña guadua	99
3.4.4. Dimensionamiento de los principales equipos del proceso	104
3.4.4.1. Horno rotatorio de carbonización	104
3.4.4.2. Dimensionamiento de la cámara de postcombustión de gases	107

3.4.4.3. Dimensionamiento de la cámara de enfriamiento del carbón.	109
3.4.4.4. Dimensionamiento de los tanques usados en el proceso	110
3.4.4.5. Dimensionamiento de los secadores de carbón impregnado y carbón activado	111
3.4.4.6. Dimensionamiento de los filtros de presión para el carbón húmedo	112
3.4.4.7. Dimensionamiento del sistema de reducción de tamaño del carbón activado	113
3.4.5. Evaluación de prefactibilidad económica	113
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
4.1. Conclusiones	120
4.2. Recomendaciones	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
ANEXOS	130

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Análisis próximo de 3 tipos de bambú diferentes	8
Tabla 1.2.	Composición química de algunos materiales lignocelulósicos	13
Tabla 3.1.	Determinación de la humedad de 4 muestras de caña guadua	56
Tabla 3.2.	Resultados de determinación de material volátil, carbón fijo y cenizas para la caña guadua	57
Tabla 3.3.	Resultados de densidad aparente, densidad real y ángulo de reposo de la caña guadua	59
Tabla 3.4.	Intervalos de descomposición de los diferentes compuestos de la caña guadua identificados en la curva TGA	62
Tabla 3.5.	Parámetros cinéticos de la lignina, celulosa y hemicelulosa determinados mediante el método de Coats-Redfen	64
Tabla 3.6.	Composición lignocelulósica de la caña guadua	66
Tabla 3.7.	Resultados de análisis de absorción atómica de una muestras de cenizas de la caña guadua	67
Tabla 3.8.	Rendimientos de la carbonización de la caña guadua a diferentes temperaturas y tiempos	75
Tabla 3.9.	Condiciones de operación para la activación del carbón de caña guadua a escala piloto	86
Tabla 3.10.	Índice de azul de metileno para carbones activados de caña a escala piloto (CACG1), escala laboratorio (CACG2) y carbón sin activar (CCG)	89
Tabla 3.11.	Índice de decoloración de azúcar para carbones activados de caña guadua producidos a escala piloto (CACG3), escala laboratorio (CACG4) y carbón sin activar (CCG)	90
Tabla 3.12.	Resultados de superficie específica BET, diámetro de poro y volumen máximo de poro para el carbón producido a escala piloto	92
Tabla 3.13.	Zonas de producción de caña guadua identificadas en la provincia de Pichincha	98

Tabla 3.14.	Lista de equipos de la planta de producción de carbón activado	102
Tabla 3.15.	Parámetros de diseño del horno rotatorio de carbonización y activación	105
Tabla 3.16.	Requerimientos energéticos para la operación del horno rotatorio de carbonización y activación	106
Tabla 3.17.	Composición en masa y moles de los gases de salida del horno rotatorio	107
Tabla 3.18.	Parámetro de diseño de la cámara de post combustión	108
Tabla 3.19.	Parámetro de diseño del lavador de gases	108
Tabla 3.20.	Composición de los gases de salida del proceso	109
Tabla 3.21.	Parámetros de diseño de la cámara de enfriamiento de carbón	110
Tabla 3.22.	Parámetros de diseño de los tanques de almacenamiento	111
Tabla 3.23.	Parámetros de diseño de los secadores S-203 y S-305	111
Tabla 3.24.	Parámetros de diseño de los filtros de carbón impregnado y activado	112
Tabla 3.25.	Parámetros de diseño del molino de martillos para reducción de tamaño del carbón activado	113
Tabla 3.26.	Parámetros de evaluación económica del proyecto “Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química usando KOH”	115
Tabla 3.27.	Montos de inversión inicial del proyecto	116
Tabla 3.28.	Nómina de personal operativo y administrativo	116
Tabla 3.29.	Costos de producción por compra de materia prima, insumos y servicios industriales	117
Tabla 3.30.	Indicadores económicos y precio de final del producto para la instalación de la planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua	118
Tabla AI.1.	Datos experimentales obtenidos en la determinación de humedad de la caña guadua	131

Tabla AI.2.	Resultados de la determinación de material volátil, carbón fijo y cenizas de 4 muestras de aserrín de caña guadua	132
Tabla AI.3.	Valores promedio obtenidos de porcentaje de material volátil, carbón fijo y cenizas de 4 muestras de aserrín de caña guadua	132
Tabla AI.4.	Resultados de la determinación de la densidad aparente en una muestra de aserrín de caña guadua	134
Tabla AI.5.	Resultados de la determinación de la densidad real en una muestra de aserrín de caña guadua	134
Tabla AII.1.	Datos de la curva TGA obtenidas del análisis termogravimétrico de la caña guadua con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min	137
Tabla AII.2.	Datos de la curva DTGA obtenidas del análisis termogravimétrico de la caña guadua	139
Tabla AII.3.	Determinación de metales en las cenizas de la caña guadua	145
Tabla AIII.1.	Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 350 °C	146
Tabla AIII.2.	Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 400 °C	147
Tabla AIII.3.	Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 500 °C	148
Tabla AIII.4.	Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 600 °C	149
Tabla AIII.5.	Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 650 °C	150
Tabla AIV.1.	Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 600 °C en el horno piloto monosolera Nichols Herreshoff en lecho fijo	151
Tabla AIV.2.	Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 600 °C en el horno piloto monosolera Nichols Herreshoff en lecho agitado	152
Tabla AIV.3.	Hoja de datos del ensayo piloto de carbonización de la caña guadua	153

Tabla AV.1.	Resultados de índice de yodo para la activación del carbón de la caña guadua impregnado con KOH en un tiempo de 2 horas a escala piloto	154
Tabla AV.2.	Resultados de índice de yodo para la activación del carbón de la caña guadua impregnado con KOH a 800 °C a escala laboratorio	155
Tabla AVI.1.	Resultados de índice de yodo para la activación del carbón de la caña guadua impregnado con KOH a 800 °C en el horno piloto monosolera Nichols Herreshoff	156
Tabla AVI.2.	Hoja de datos del ensayo piloto para la activación del carbón de la caña guadua	157
Tabla AVII.1	Composición de los gases de salida del horno rotatorio de carbonización	162
Tabla AVII.2.	Parámetros para el dimensionamiento del horno rotatorio de carbonización y activación	166
Tabla AVIII.1.	Costos de maquinaria y equipo del que consta la planta de producción de carbón activado	168
Tabla AVIII.2.	Costos de equipos y muebles de oficina del que consta la planta de producción de carbón activado	168
Tabla AVIII.3.	Flujo de caja para los primeros 5 años del proyecto "Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química usando KOH"	169

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Aspecto de una caña guadua madura (<i>Guadua Angustifolia</i> K.)	2
Figura 1.2.	Principales partes de la caña guadua	3
Figura 1.3.	Corte longitudinal de la caña guadua donde se observan las células (a) pequeñas y (b) grandes de las que se compone el parénquima	5
Figura 1.4.	Corte de la pared celular de la caña guadua donde se observa (a) epidemis, (b) hipodermis y (c) parénquima cortical	6
Figura 1.5.	Estructura molecular de la celulosa	11
Figura 1.6.	Estructura molecular de la hemicelulosa	12
Figura 1.7.	Algunas estructuras características de la lignina	13
Figura 1.8.	Proceso de pirólisis en una partícula de biomasa	14
Figura 1.9.	Mecanismo de la pirólisis del bambú	16
Figura 1.10.	Curvas TGA de la pirólisis de bambú a diferentes tasas de calentamiento	18
Figura 1.11.	Imágenes de MEB de grafito natural (A) sin activar y (E) activado	28
Figura 1.12.	Ciclo del KOH durante el proceso de activación química	31
Figura 1.13.	Influencia de el factor (g KOH/g Carbón) en la superficie BET de los carbones activados	32
Figura 1.14.	Influencia de la temperatura en el la superficie BET de carbones activados de endocarpios de níspero usando KOH (ACK) y NaOH (ACN)	34
Figura 1.15.	Influencia de la temperatura en la superficie de los microporos de carbones activados de endocarpios de níspero usando KOH (ACK) y NaOH (ACN)	35
Figura 2.1.	Esquemas de los crisoles con (a) muestra de caña guadua y (b) tapada con aserrín para la carbonización de la caña guadua	42

Figura 2.2.	Horno piloto Nichols Herreshoff mono solera	44
Figura 2.3.	Caña guadua trozada al interior del horno piloto mono solera Nichols Herreshoff con el sistema sin agitación	44
Figura 2.4.	Caña guadua trozada al interior del horno piloto mono solera Nichols Herreshoff con el sistema de agitación	45
Figura 3.1.	Aspecto de la caña guadua luego del proceso de reducción de tamaño	55
Figura 3.2.	Curva TGA de la pirólisis de una muestra de caña guadua con velocidad de calentamiento de 10°K/min (<i>Guadua Angustifolia</i> K.)	60
Figura 3.3.	Curva DTGA de la pirólisis de una muestra de caña guadua con velocidad de calentamiento de 10°K/min (<i>Guadua Angustifolia</i> K.)	61
Figura 3.4.	Linealización $\ln\left[\frac{AR}{\beta E_a}\left(1 - \frac{2RT}{E_a}\right)\right]$ vs $\frac{1}{T}$ para la determinación de los parámetros cinéticos de la lignina celulosa y hemicelulosa	63
Figura 3.5.	Curvas DTG obtenidas a partir de los parámetros cinéticos determinados para: celulosa (C), hemicelulosa (H), lignina (L) y caña guadua (calc)	65
Figura 3.6.	Fotografías MEB de la estructura de la caña guadua a (a) mínimo aumento y (b) 100 grados de aumento	68
Figura 3.7.	Carbonización de la caña guadua en función de la temperatura a un tiempo de 1 h	70
Figura 3.8.	Carbonización de la caña guadua en función de la temperatura a un tiempo de 2 h	71
Figura 3.9.	Carbonización de la caña guadua en función del tiempo a 400 °C	72
Figura 3.10.	Carbonización de la caña guadua en función del tiempo a 500 °C	73
Figura 3.11.	Carbonización de la caña guadua en función del tiempo a 600 °C	74
Figura 3.12.	Cinética de carbonización de la caña guadua a 600 °C, sin agitación en el horno piloto Nichols Herreshoff	77
Figura 3.13.	Cinética de carbonización de la caña guadua a 600 °C, con agitación en el horno piloto Nichols Herreshoff	78

Figura 3.14.	Fotografías MEB del carbón de la caña guadua obtenido a escala piloto a (a) mínimo aumento y (b) 150 grados de aumento	79
Figura 3.15.	Análisis de la influencia de la temperatura en la activación química del carbón de la caña guadua	82
Figura 3.16.	Análisis de la influencia del tiempo en la activación química del carbón de la caña guadua a temperatura de 800 °C	83
Figura 3.17.	Análisis de la influencia de la relación g KOH/ g C.C.G. en la activación química del carbón de la caña guadua a temperatura de 800 °C	84
Figura 3.18.	Cinética de activación química a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff del carbón de la caña guadua usando KOH	87
Figura 3.19.	Espectro FTIR de una muestra de carbón activado de caña guadua producido a escala piloto	91
Figura 3.20.	Isotermas de adsorción y desorción de N ₂ del carbón activado de la caña guadua usando KOH a escala piloto	93
Figura 3.21.	Distribución de tamaño de poro para el carbón activado de la caña guadua usando KOH a escala piloto	94
Figura 3.22.	Fotografías MEB del carbón activado de caña guadua obtenido a escala piloto a (a) 500 grados de aumento y (b) 700 grados de aumento	95
Figura 3.23.	Fotografía MEB del carbón activado de caña guadua obtenido a escala piloto a 1800 grados de aumento	96
Figura 3.24.	Diagrama BFD Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua	100
Figura 3.25.	Diagrama PFD Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua	103
Figura 3.26.	Diagrama Lay-out Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua	114
Figura 3.27.	Punto de equilibrio del proyecto “Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química con KOH”	118
Figura AI.1.	Esquema para la determinación del ángulo de reposo de la caña guauda	136

Figura AII.1.	Linealización de la zona de altas temperaturas para la obtención de los parámetros cinéticos de la lignina	141
Figura AII.2.	Linealización de la zona de medias temperaturas para la obtención de los parámetros cinéticos de la celulosa	142
Figura AII.3.	Linealización de la zona de medias temperaturas para la obtención de los parámetros cinéticos de la hemicelulosa	144

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Caracterización física de la caña guadua: Métodos empleados y ejemplo de cálculo	131
ANEXO II Caracterización química de la caña guadua: Métodos empleados y ejemplo de cálculo	137
ANEXO III Evaluación de los parámetros de carbonización de la caña guadua a escala laboratorio	146
ANEXO IV Evaluación de los parámetros de carbonización de la caña guadua a escala piloto	151
ANEXO V Pruebas a escala laboratorio para la activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua	154
ANEXO VI Pruebas a escala piloto para la activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua	156
ANEXO VII Diseño de una planta para la producción de 10 t/mes de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química con hidróxido de potasio	158
ANEXO VIII Evaluación de prefactibilidad económica para la instalación de una planta para la producción de 10 t/mes de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química	168

RESUMEN

Se estudió la producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química usando hidróxido de potasio como agente activante. En la caracterización de la caña guadua se determinó que en su estructura tiene un porcentaje de carbón fijo del 15,5 % y una composición química del 31,1 % de lignina, 41,1 % de celulosa y 21,1 % de hemicelulosa.

Para la producción de carbón a partir de la caña guadua se realizaron pruebas a escala laboratorio de carbonización en atmósfera reductora. Se determinó que la temperatura óptima de carbonización a escala laboratorio de la caña guadua es a 600 °C y 2 horas donde se obtiene un producto con 83,8 % de carbón fijo. En la prueba a escala piloto en el horno monosolera Nichols Herreshoff se carbonizaron 5 kg de caña guadua a 600 °C y un factor lambda (λ) de 0,9. En este ensayo se obtuvo a los 30 minutos de operación un producto con un porcentaje de carbón fijo de 74,9 %.

Se analizaron los parámetros de temperatura, tiempo y relación hidróxido de sodio por gramo de carbón (g KOH/g C.C.G.) para activar el carbón de la caña guadua producido a escala piloto. Se realizó la impregnación del hidróxido de potasio en el carbón en medio acuoso con agitación a 92 °C. Los resultados a escala laboratorio determinaron que la relación g KOH/g C.C.G. igual a 2, un tiempo de 3 horas y a 800 °C se obtienen 713 mg I₂/g C.A. de índice de yodo. Estas condiciones fueron puestas a prueba a escala piloto para la activación de 1 kg de carbón de caña guadua en el horno monosolera Nichols Herreshoff a 800 °C durante 5 horas. El carbón producido a escala piloto alcanzó un índice de yodo de 661 mg I₂/g C.A.

El carbón producido a escala piloto se caracterizó por microscopía electrónica, mediante análisis de espectrometría de infra rojos por Transformada de Fourier (FTIR) y también con un análisis de superficie específica BET. El análisis FTIR determinó la presencia de grupos funcionales en la superficie del carbón. El

análisis BET determinó que el carbón posee un área específica de 503,4 m²/g y un volumen de poro de 0,2324 cm³/g.

La planta para la producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química constó de 3 etapas: una etapa de carbonización, una segunda etapa de impregnación de la sal de potasio en el carbón producido y una tercera etapa de activación y recuperación de la sal de potasio. El carbón activado producido cumplió con las normas nacionales en cuanto a índice de yodo (mayor a 600 mg I₂/g C.A.) y a granulometría (menor a 75 µm). Además el diseño de la planta consideró también el diseño de un sistema de postcombustión y lavado de gases para evitar la emanación de gases de efecto invernadero y evitar contaminación térmica. La planta producirá 10 644 kg/mes de carbón activado, con una capacidad de operación de 45 000 kg/mes de caña guadua.

El análisis económico de pre factibilidad dio como resultado que si el carbón es comercializado a un precio de 3,85 USD/kg se obtiene una tasa interna de retorno (TIR) del 16 % y un valor actual neto de 14 313,49 USD, parámetros que definen como viable al proyecto. La inversión inicial para la instalación del proyecto se recupera al quinto año de operación de la planta.

INTRODUCCIÓN

El carbón activado es un material muy conocido por sus altas propiedades de adsorción. Esta característica se debe a su alta superficie específica, alta porosidad y reactividad de superficie. Estas propiedades lo convierten en un material altamente importante en áreas industriales como catálisis química, metalurgia extractiva y eliminación de contaminantes de efluentes líquidos y gaseosos. Ante la elevada demanda de este material, se hace cada vez más necesaria la búsqueda de recursos abundantes, amigables con el medio ambiente, y de bajo costo para producir carbón (González-García et al., 2012, p. 731).

Según Song et al. (2012), la porosidad que desarrolla el carbón es altamente dependiente del método de activación que se use. Un material carbonáceo puede activarse por métodos físicos o químicos, y cada uno de estos métodos puede desarrollar una distribución de mesoporos y microporos diferente. (p. 254).

En activaciones por métodos físicos se pone en contacto al carbón con corrientes gaseosas de CO_2 o vapor de agua temperaturas entre 800°C a 1000°C . En la activación por métodos químicos se usa reactivos como ZnCl_2 , H_3PO_4 , o KOH que actúan sobre la matriz de la materia prima o el carbón proveniente de la materia prima. Los métodos de activación química se dan a temperaturas entre 400°C a 800°C . De los 3 agentes activantes químicos que se usan, el hidróxido de potasio (KOH) presenta un método de activación distinto al de los otros 2 agentes. El KOH , en lugar de ser un agente deshidratante de los polímeros de la materia prima como lo son el cloruro de zinc (ZnCl_2) o el ácido fosfórico (H_3PO_4), actúa intercalándose entre las capas del carbón, que luego, a temperaturas de alrededor de los 800°C se libera de la matriz a través de un mecanismo de desorción que es lo que va formando la porosidad en el carbón. Este proceso es conocido como exfoliación (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 329).

Las ventajas que presenta la activación química frente a la física son varias, pero la principal se refiere al ahorro energético, ya que las temperaturas para activar

químicamente son más bajas que las que se necesita en activaciones físicas, además de que, la activación con KOH, genera una mayor superficie específica donde prevalece la formación de microporos. (Song et al., 2012, p. 254)

El bambú es un material lignocelulósico muy abundante en la naturaleza. Las aplicaciones del bambú son muy diversas, van desde el área de la construcción hasta aplicaciones energéticas, usándolo como biomasa por ejemplo. Al ser un material compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina, abundante, de rápido crecimiento y de bajo costo, se convierte en un ideal precursor para la producción de carbón activado.

En el Ecuador, la caña guadua (*Guadua angustifolia* K.) es un bambú que crece en la zona subtropical, a altitudes desde los 0 msnm hasta los 1800 msnm. En el país, y en particular en la provincia de Pichincha se estudia una cadena de valoración del bambú en general, y de la caña guadua en particular, para aprovecharlo como materia prima a escala local (Gobierno de la Provincia de Pichincha, 2011), pero no se han considerado posibilidades de industrialización para escala nacional. La caña guadua representa el 70% del bambú que existe en el Ecuador (Gobierno de la Provincia de Pichincha, 2011). La mayoría de aplicaciones en las que se emplea la caña guadua es en construcción rural, insumos para la construcción urbana, como materia prima en carpintería y en la fabricación de artesanías, por lo que es muy recomendable darle un valor agregado para aplicaciones industriales como la que se propone en este trabajo.

No existen estudios a nivel nacional que utilicen al bambú como materia prima para la producción de carbón activado, y los estudios a nivel internacional realizados por González-García et al. (2012) muestran que el bambú es un material idóneo para la producción de carbón activado vía activación química utilizando hidróxido de potasio, donde la caña guadua (*Guadua angustifolia* K.) presenta los mejores resultados en cuanto a superficie específica. De ahí la importancia de aprovechar este recurso disponible en el país para la producción de carbón activado.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA CAÑA GUAGUA (*GUADUA ANGUSTIFOLIA* K.)

La caña guadua (*Guadua angustifolia* K.) es una especie nativa de América Latina que crece principalmente en la cuenca amazónica de Colombia y Ecuador. También se la conoce como caña brava o caña de Guayaquil. La caña guadua es un bambú de la familia de Poaceae, subfamilia Baumbusoideae y tribu Guaduinae. (Chiluiza y Hernandez, 2009, p. 1).

La caña guadua es una gramínea de rápido crecimiento. Produce más oxígeno y captura más CO₂ que cualquiera otra planta o árbol, y además posee muchas ventajas ecológicas, técnicas y económicas. Actualmente a la caña guadua se le atribuye más de 1500 aplicaciones. En general la caña guadua crece muy rápido, tanto que puede alcanzar alturas de 10 m a 20 m en menos de un año. Tiene la forma de un tubo ligeramente cónico y el diámetro exterior puede variar de 3 cm a 25 cm, dependiendo de la especie. (González, 2014, p. 2).

Existen 2 variedades de caña guadua dentro de la especie, que se mencionan a continuación:

- *Guadua angustifolia* K. *bicolor*, que también es conocida como guadua rayada. Su principal característica es la de poseer rayas amarillas en cada uno de los nudos.
- *Guadua angustifolia* K. *nigra*, que también es conocida como guadua negra. Posee un color verde oscuro con leves manchas negras

En la Figura 1.1 se observa el aspecto de una *Guadua Angustifolia* K. madura, variedad bicolor proveniente de la zona de Nanegal, provincia de Pichincha. Esta especie es la materia prima con la que se desarrolló el presente proyecto de titulación.



Figura 1.1. Aspecto de una caña guadua madura (*Guadua Angustifolia* K.)

En general la caña guadua tiene un ciclo de vida desde los 10 a los 11 años. En este periodo atraviesa por 4 estados de madurez que son conocidos como: brote, juvenil, madurez y sobre madurez. La caña guadua en particular y el bambú en general también se desarrolla en Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Brasil, Paraguay. Exceptuando Chile y las islas del Caribe la caña guadua se da en el resto de países de América Latina entre una altitud óptima de 600 a 2 000 msnm. Además las condiciones adecuadas de temperatura para su crecimiento está entre 20 °C A 26 °C y una humedad comprendida entre 75% a 85% (Chiluiza y Hernandez, 2009, p. 6).

1.1.1. MORFOLOGÍA Y ESTRUCTURA ANATÓMICA DE LA CAÑA GUADUA

1.1.1.1. Morfología de la caña guadua

En la morfología de la caña guadua se puede identificar 4 partes principales en su estructura que son: raíces, rizomas, culmos y ramas. Además, la caña guadua también tiene como parte de su morfología hojas, follajes y frutos.

Un esquema de las principales partes de la caña guadua se observa en la Figura 1.2.

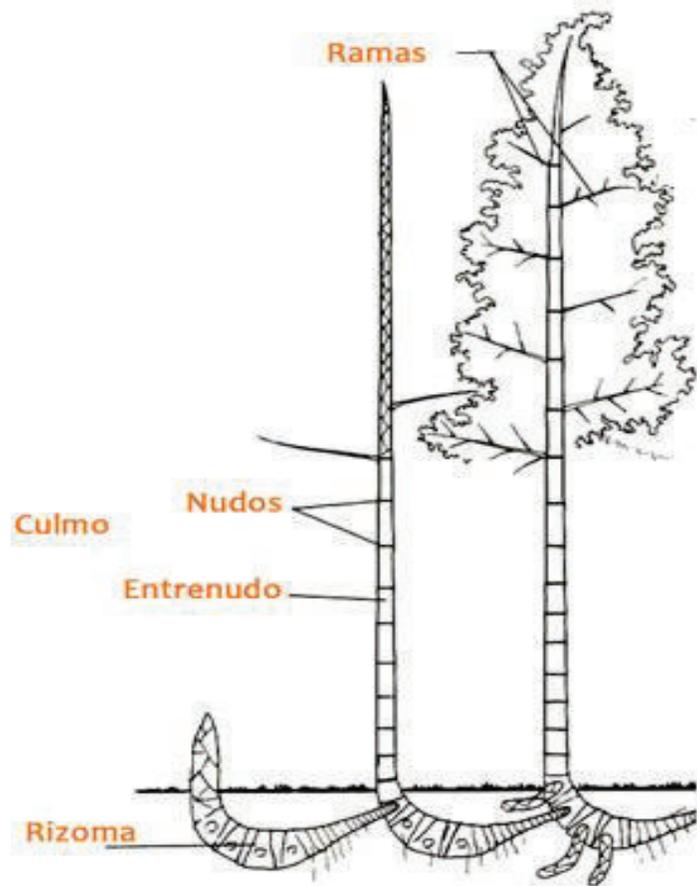


Figura 1.2. Principales partes de la caña guadua. (Bambusa.es, 2014) modificado

- **Raíces:** Dependiendo del suelo en donde crezca la caña guadua, las raíces pueden tener un diámetro de alrededor de 5 mm y además estas raíces pueden alcanzar profundidades de hasta 1,5 m bajo el suelo. Además, las raíces pueden profundizarse varios metros por debajo del suelo o expandirse de forma horizontal para poder darle a la caña guadua una gran estabilidad y firmeza.
- **Rizoma:** El rizoma es un eje subterráneo y segmentado que hace las veces de soporte de la serie de cañas que derivan de planta. A través de este eje, el bambú puede absorber nutrientes del suelo. El rizoma además posee una serie de raíces adventicias que se encuentran en la parte baja de su eje.

- **Culmo:** Los culmos constituyen los ejes que emergen de la estructura del rizoma, uno encima de otro y dan lugar al cuerpo de la caña guadua como tal. Son segmentos leñosos y ligeramente arqueados en la punta. En la estructura del culmo se pueden observar 2 partes complementarias conocidas como nudos y entrenudos. Los entrenudos son cilindros huecos de textura dura y consistente con un diámetro que va de 10 a 20 cm. Los nudos en cambio son secciones que se encuentran cerrando entre cada entrenudo. En los entrenudos por lo general es donde crecen las ramas y frutos de la caña guadua.
- **Ramas:** se originan en las yemas de los nudos del culmo. Hay dos tipos de ramas según su posición. Las ramas basales, que son más bien una especie de espinas que se ubican en la parte inferior de la caña. El otro tipo de ramas son las apicales. Estas ramas son delgadas y largas y se ubican en la parte superior de la caña guadua.

1.1.1.2. Anatomía de la caña guadua

La anatomía de la caña guadua se compone principalmente de haces vasculares colaterales incrustados en el tejido parénquima. El tamaño, número, forma y concentración de los haces vasculares varía desde la periferia hacia la sección interior de la caña, y desde la base hasta su parte más alta. Cerca de la periferia de la caña, los haces vasculares son pequeños y muy numerosos, mientras que en la sección media de la caña son más grandes y espaciados. En todos los bambúes el tamaño de los haces vasculares disminuye notablemente desde la base hacia el vértice con un aumento correspondiente en su densidad (Londoño, Camayo, Riaño y Lopez. 2002, p. 19).

El tejido de parénquima está compuesto de células largas de pared gruesa generalmente y células cortas con forma cúbica, conectadas por orificios localizados en las paredes longitudinales. Su función aún no está bien investigada pero se presume que son influyentes en los procesos de maduración de la caña.

En la Figura 1.3 se puede observar un corte transversal de la caña guadua (Londoño et al. 2002, p. 20).

El tejido de la caña guadua, al igual que los bambúes, está conformado de una corteza (epidermis, hipodermis y parénquima cortical), células parénquimáticas, fibras y paquetes vasculares. La composición de los bambúes en promedio está compuesto de 52% de parénquima, 40% de fibra y 8% de células conductoras. (Londoño et al. 2002, p. 19).

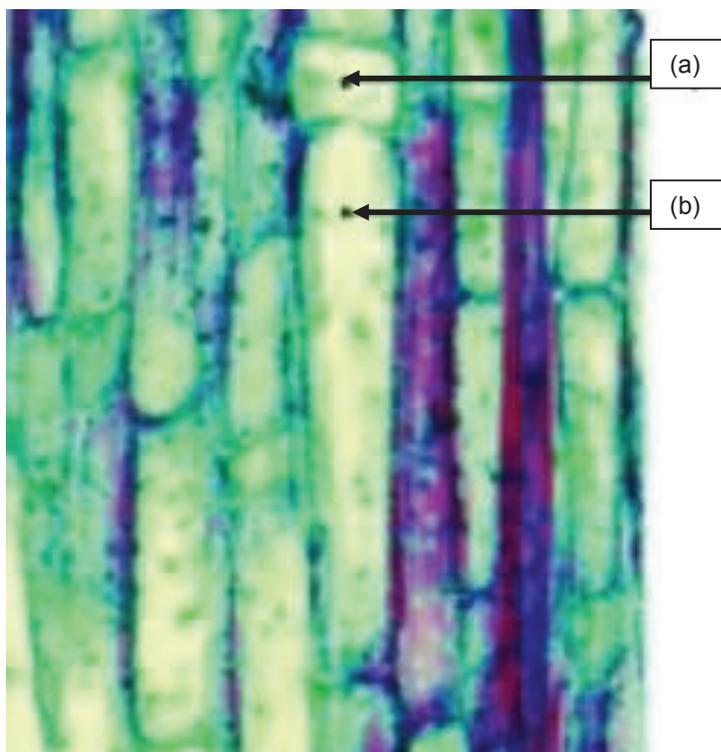


Figura 1.3. Corte longitudinal de la caña guadua donde se observan las células (a) pequeñas y (b) grandes de las que se compone el parénquima (Londoño et al. 2002) modificado

En la Figura 1.4 se puede observar el corte de la pared celular de la caña guadua. La epidermis de la caña guadua está compuesta de células largas entremezcladas con células cortas que se agrupan en pares entre las células largas y estomas que tienen forma de ovoide. La hipodermis consiste de 2 a 3 capas de células esclerenquimatosas con una pared gruesa, con un parénquima cortical homogéneo. El tamaño de las células en la hipodermis se incrementa

desde la periferia hacia la parte interior de la caña guadua (Londoño et al. 2002, p. 19).

El conocimiento de la anatomía de la caña guadua en particular, y de los bambúes en general, sirve como base para la determinación de sus propiedades principales y de sus posteriores aplicaciones. Un ejemplo de esto es la dependencia de las propiedades físicas de la caña, entre ellas su gravedad específica que posee. Esta propiedad física es altamente dependiente del contenido y diámetro de las fibras y del espesor de las células de la pared celular. Este análisis es muy útil en industria como la de pulpa y papel donde la longitud de la fibra y el espesor de la pared celular de la fibra determina la calidad de la pulpa (Londoño et al. 2002, p. 18).

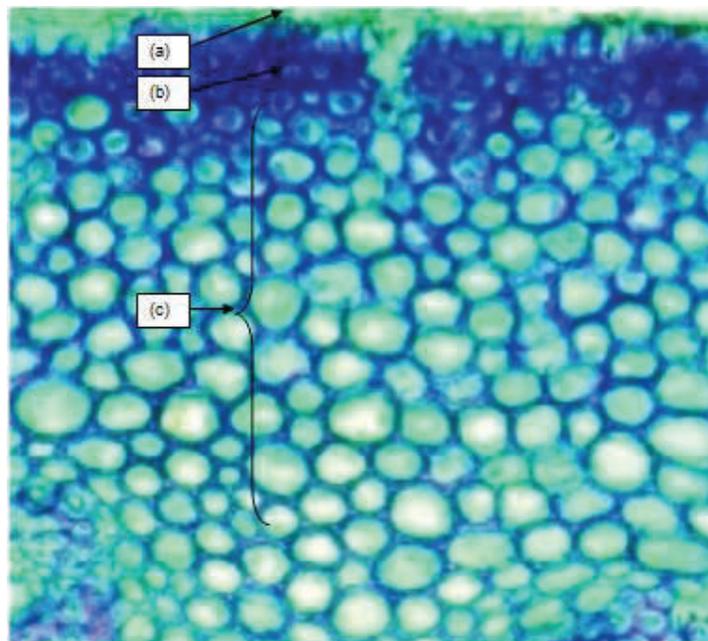


Figura 1.4. Corte de la pared celular de la caña guadua donde se observa (a) epidemis, (b) hipodermis y (c) parénquima cortical (Londoño et al. 2002) modificado

1.1.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CAÑA GUADUA

La caña guadua es un recurso natural sostenible con una alta tasa de crecimiento. Esta tasa se encuentra entre los 11 a 21 cm por día en algunas ocasiones. Las

poblaciones que gozan de la presencia de este recurso cubren varias de sus necesidades básicas gracias a la ayuda de la caña guadua. Se considera un material ideal para la construcción ya que posee excelentes propiedades estructurales como una alta relación resistencia/peso, alta capacidad de absorción de energía y excelente flexibilidad. (Londoño, et al., 2002, p.18-19).

El peso específico de un bambú está comprendido entre 0,40 y 0,80 lo que equivale a 400 kg/m^3 a 800 kg/m^3 dependiendo exclusivamente de su estructura anatómica. (INEN, 1976, p. 4). Por ejemplo la caña guadua tiene una gravedad específica de 0,55 en promedio. A pesar de tener un valor tan bajo de gravedad específica la caña guadua posee una alta resistencia y flexibilidad haciéndolo un material de construcción muy resistente. (Li, 2002, p. 28).

El contenido de humedad de la caña guadua y en general del bambú presenta variación desde las partes superiores a las inferiores y desde las partes periféricas hasta a la central de su estructura. Un bambú puede tener hasta un 100% de humedad en base seca. Este valor puede variar desde el 15,5% para las capas internas del bambú, hasta el 70% para las capas periféricas. La variación de la humedad a lo largo de la altura del bambú puede variar desde el 82% en la parte superior hasta el 110% de humedad en la parte inferior. (Li, 2002, p. 28).

En la Tabla 1.1 se observa un análisis de contenido de humedad, material volátil, carbón fijo y cenizas para diferentes tipos de bambúes incluyendo la caña guadua. Sin embargo las principales y más conocidas propiedades físicas del bambú es su gran resistencia mecánica a la compresión y la tracción.

Según Ghavami y Marinho (2005), la estructura fibrosa de la caña guadua le da una gran resistencia a la tracción, presentado valores que alcanzan en promedio los 86,96 MPa. Los valores más altos de resistencia mecánica se encontraron en la parte central de los culmos de la caña guadua donde se obtienen valores de 95,8 MPa. La resistencia a la compresión media para la caña guadua presenta un valor medio de 29,48 MPa. Estos valores exclusivos de la caña guadua sin

embargo son menores a valores reportados para otros tipos de bambúes. Por ejemplo el *Dendrcalamus giganteus* tiene una resistencia a la tracción superior en un 40% aproximadamente a la resistencia que tiene la caña guadua (p. 114).

Tabla 1.1 Análisis próximo de 3 tipos diferentes de bambú (González et al. 2013, p.34) modificado

	B. Oldhami (%)	B. Vulgaris (%)	G. Angustifolia (%)
Humedad*	9,1	9,1	9,1
Material Volátil	76,4	73,9	74,1
Cenizas	1,1	1,5	2,9
Carbón Fijo	22,6	24,7	23,1

*En base húmeda

1.1.3. PROPIEDADES QUÍMICAS DE LA CAÑA GUADUA

La composición química de la caña guadua es similar a la de las maderas o los árboles. Los principales constituyentes de la caña guadua son la celulosa, hemicelulosa y lignina que representan alrededor del 90% de su masa total. En menor medida se encuentra en su estructura resinas, taninos y sales inorgánicas. Sin embargo en comparación con la madera, la caña guadua posee en su estructura altas cantidades de extractos alcalinos, cenizas y sílice. (Li, 2002, p. 5). Las propiedades de los polímeros constituyentes de la caña guadua y en general de la biomasa se describirán más a detalle en la sección 1.2.

El bambú tiene más componentes orgánicos además de la celulosa, hemicelulosa y lignina. Contiene aproximadamente entre un 2,0–6,0 % de almidón, 2,0-4,0 % de grasa y 0,8-6,0 % de proteínas. La composición química del bambú influye en su durabilidad y resistencia contra el moho, hongos e insectos. Las cenizas de los bambúes poseen en su composición minerales orgánicos como el silicio, calcio y potasio. Otro tipo de metales comunes son el magnesio o el manganeso. Es importante la caracterización de las cenizas del bambú ya que altas cantidades de estos elementos pueden influir en proceso de tratamiento a los que se someta la

caña guadua. En los entrenudos de la caña guadua es donde existen mayores cantidades de cenizas. Sin embargo las diferencias en la composición química entre los nudos y los entrenudos no es apreciable y no se considera un factor crítico para su utilización en aplicaciones energéticas o construcción (Li, 2002, p. 6).

1.2. CARBONIZACIÓN DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

1.2.1. MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

Los materiales lignocelulósicos, que son el mayor componente de la biomasa, representan casi la mitad de toda la materia producida mediante fotosíntesis. Todos estos materiales constituyentes de la biomasa están compuestos por 3 polímeros naturales: celulosa, hemicelulosa y lignina. (Kuhad y Singh, 2007, p. 3).

El material lignocelulósico es la parte no amilácea y fibrosa de los materiales vegetales. A diferencia de los carbohidratos o los almidones, los materiales lignocelulósicos no son digeribles por los seres humanos. Un ejemplo de esto es que podemos comer el arroz que es un carbohidrato pero no podemos digerir su cascara o su paja que son materiales puramente lignocelulósicos. Toda la biomasa lignocelulósica no es parte de la cadena alimenticia humana por tanto su uso como recursos renovables para fuentes energéticas no representa una amenaza al suministro alimenticio en el mundo. (Basu, 2013, p. 50)

La biomasa, y en particular los materiales lignocelulósicos, han cobrado gran importancia en la actualidad ya que empiezan a ser considerados para una amplia gama de aplicaciones debido a su gran disponibilidad, rápida regeneración y bajo costo. Entre las nuevas aplicaciones que actualmente se da a los materiales lignocelulósicos son: producción de energía calórica, eléctrica y mecánica, obtención de bioaceites y biocombustibles, producción de gases de síntesis,

producción de gas combustible, producción de carbón combustible, carbón vegetal y carbones adsorbentes y absorbentes. (Capareda, 2014, p. 53).

El carbón vegetal es un subproducto de los procesos de pirólisis y gasificación de la biomasa. El carbón constituye del 10 al 40 % de la masa de todos los materiales lignocelulósicos e incluso en algunas ocasiones tiene un valor económico y energético mucho mayor que el de la biomasa como tal. (Capareda, 2014, p. 75)

La composición de los materiales lignocelulósicos es de vital importancia en los procesos de carbonización y pirólisis ya que a partir de su composición se puede predecir el rendimiento de la materia en estos procesos. La biomasa es una mezcla muy variada de materiales como carbohidratos, grasas y proteínas junto con pequeñas cantidades de minerales como sodio (Na), fósforo (P), aluminio (Al), calcio (Ca) y hierro (Fe). Todos estos componentes se distribuyen en los siguientes componentes:

- **Extractivos:** donde se incluyen sustancias presentes en el tejido vegetal. Pueden ser proteínas, una gran cantidad de aceites esenciales, almidones y azúcares.
- **Pared celular:** es lo que proporciona una resistencia estructural a la biomasa. Se compone principalmente de carbohidratos, que son principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina.
- **Cenizas:** son todos los componentes inorgánicos presentes en la biomasa. Aquí se encuentran una gran cantidad de metales como por ejemplo hierro, sodio, fósforo y potasio.

Los componentes mayoritarios de la pared celular son: celulosa, hemicelulosa y lignina. El porcentaje de composición en masa de estos tres componentes varía dependiendo de varios factores entre los que se encuentran el tipo de biomasa, del lugar donde crece el bambú. Incluso varían dependiendo del clima y la altitud

a la que se desarrolla el bambú. Generalmente estos tres polímeros son los que representan el mayor porcentaje en masa de los materiales lignocelulósicos y puede variar su porcentaje de composición. (Basu, 2013, p. 56)

1.2.1.1. Celulosa

La celulosa es el compuesto orgánico más abundante en la Tierra. Además es el componente estructural primario de las paredes celulares de la biomasa. La estructura molecular de la celulosa se observa en la Figura 1.5.

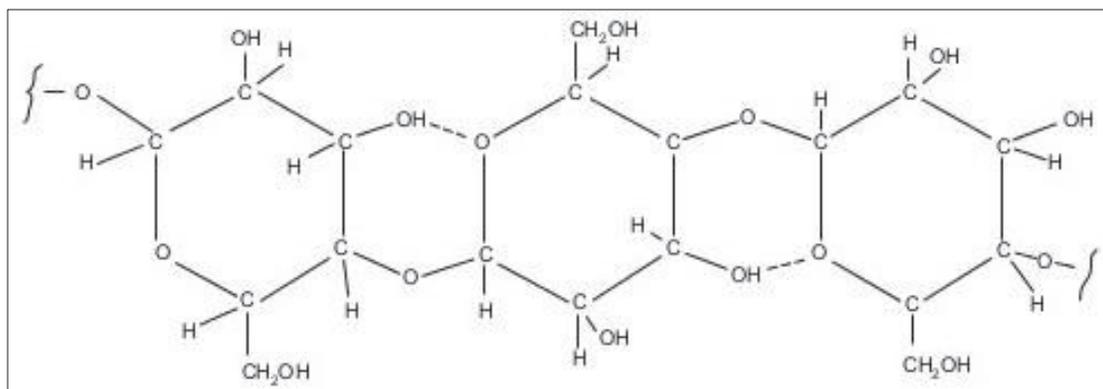


Figura 1.5. Estructura molecular de la celulosa (Basu, 2013, p. 56)

La celulosa es un polímero de gran peso molecular, de cadena larga y con alto grado de polimerización. Su fórmula genérica es $(C_6H_{10}O_5)_n$. Tiene una estructura cristalina que contiene cientos de unidades formadas por moléculas de glucosa. La celulosa es altamente insoluble y no es digerible por los humanos a pesar de ser un carbohidrato. La madera está compuesta entre el 40% al 44% de celulosa en base seca, siendo así su mayor constituyente. (Basu, 2013, p. 58)

1.2.1.2. Hemicelulosa

La hemicelulosa es otro constituyente de las paredes celulares de las plantas. Presenta una estructura aleatoria muy débil y amorfa. Es un grupo de

carbohidratos con cadenas ramificadas y con un grado de polimerización bajo. Su fórmula genérica es $C_5H_8O_4$. La composición y estructura de la hemicelulosa es muy variable dependiendo del tipo de material lignocelulósico. (Basu, 2013, p. 59) A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa puede ser soluble en ácidos alcalinos diluidos. Algunos ejemplos de hemicelulosa son los xilanos, que son los más abundantes en la naturaleza. También son tipos de hemicelulosa la D-glucosa y D-manosa entre otras. Entre el 10% al 30% del peso de la biomasa en base seca está constituido por hemicelulosa (Klass, 1998, p.84). Un esquema de la estructura molecular de la hemicelulosa se observa en la Figura 1.6.

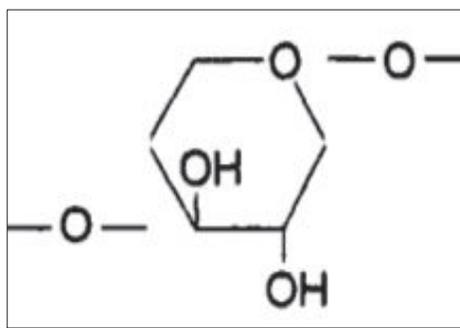


Figura 1.6. Estructura molecular de la hemicelulosa (Klass, 1998, p.83)

En los procesos de pirolisis y gasificación la celulosa produce grandes cantidades de brea pero a cambio la hemicelulosa produce preferentemente productos gaseosos y en menor medida brea y alquitrán (Klass, 1998, p.85).

1.2.1.3. Lignina

La lignina es un polímero complejo altamente ramificado. La lignina es el segundo polímero orgánico más abundante en la naturaleza, superado solo por la celulosa y además es el tercer componente estructural de la madera (Basu, 2013, p. 60).

La unidad monomérica mayoritaria en la estructura de la lignina es el benceno, al que va ligado varios grupos como metoxilo, hidroxilo y propil y que a su vez son capaces de enlazarse a otras unidades. No existe una sola fórmula estándar para

representar a la lignina, pero una de las fórmulas moleculares estándar conocidas es $(C_{10}H_{12}O_3)_n$. Algunas de las estructuras moleculares que se conoce de la lignina se pueden observar en la Figura 1.7. (Altawel, 2014, p.31). Nótese siempre la presencia del anillo aromático del benceno enlazado a grupos carbonilos en su estructura.

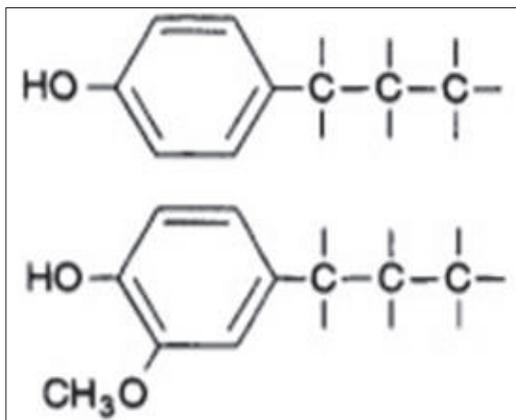


Figura 1.7. Algunas estructuras características de la lignina (Basu, 2013, p. 60).

En la Tabla 1.2 se muestra la composición de lignina, celulosa y hemicelulosa de varios tipos de madera. La composición en base seca de lignina en la madera en general va desde el 18% al 25%, pero puede llegar hasta el 35% si se trata de maderas blandas como la balsa (*Ochroma Lagopus*) (Klass, 1998, p.82).

Tabla 1.2. Composición química de algunos materiales lignocelulósicos. (Basu, 2013, p. 60) modificado

Material Lignocelulósico	Celulosa (%)	Lignina (%)	Hemicelulosa (%)
Madera Dura	43,0-47,0	18,0-26,0	39,0-17,0
Madera deAlamo	53,0	16,0	31,0
Madera de Balsamo	44,0	29,0	27,0
Madera de Pino	41,0	29,0	30,0
CañaGuadua* (<i>Guadua Angustifolia</i> K.)	43,3	26,2	24,6

*(Oyedun, Gebreegziabher y Hui, 2013, p. 596)

1.2.2. CARBONIZACIÓN DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

La carbonización es un proceso por el cual se forma un material sólido con alto contenido de carbono a partir de la descomposición de materiales orgánicos mediante pirólisis en atmósfera inerte (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 479).

Durante el proceso de pirólisis, los hidrocarburos presentes en la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina) se descomponen por efecto de las altas temperaturas, dando lugar a la formación de productos gaseosos y líquidos que dejan como residuo carbón. La pirólisis de los materiales lignocelulósicos se lleva a cabo a temperaturas que van desde 300 °C hasta los 650 °C. En la Figura 1.8 se puede observar un esquema donde se señalan los productos que se forman al pirolizar una partícula de biomasa. (Basu, 2013, p. 147).

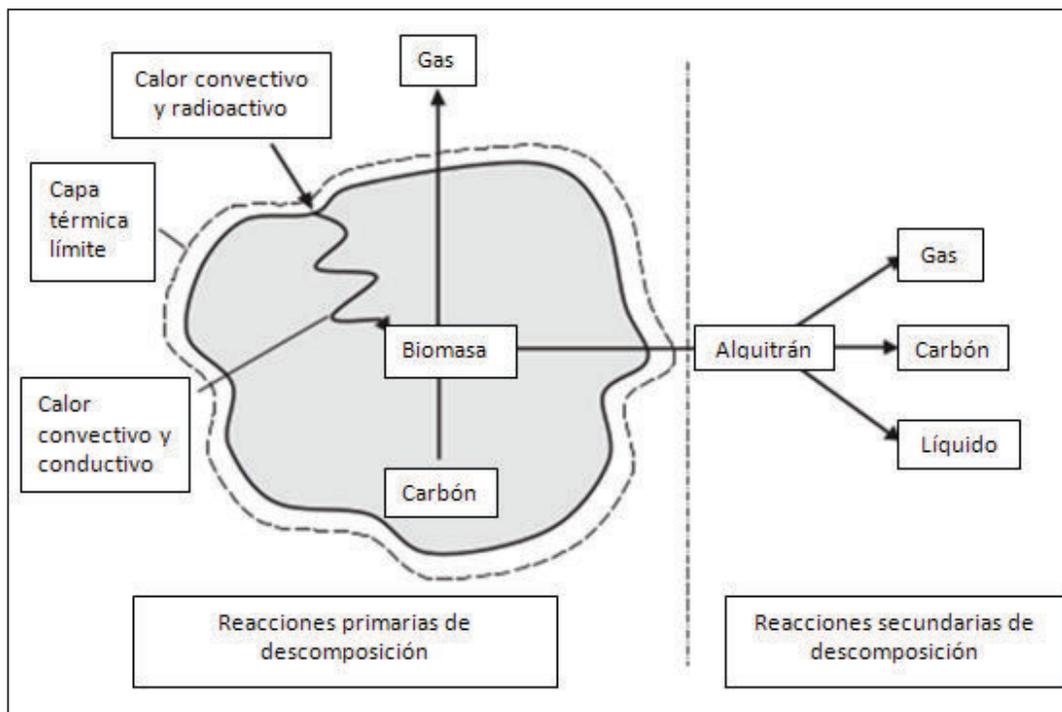


Figura 1.8. Proceso de pirólisis en una partícula de biomasa (Basu, 2013, p. 150) modificado

En la pirólisis de los materiales lignocelulósicos, cada uno de sus polímeros constituyentes se descompone a diferentes rangos de temperatura. Así por

ejemplo la hemicelulosa se descompone entre 200 °C a 260 °C, la celulosa entre 240 °C a 350 °C y la lignina entre 280 °C a 500 °C. (Park, 2008, p. 2).

La pirólisis de materiales lignocelulósicos se puede dividir en 4 fases: eliminación de la humedad, descomposición de la hemicelulosa, descomposición de la celulosa y descomposición de la lignina, aunque también se puede suponer que la pirólisis de la biomasa es una superposición de los mecanismos de descomposición de estos 3 componentes (Yang, Yan, Chen, Lee y Zheng, 2007, p.1781).

La gran mayoría de estudios de pirólisis de diversos materiales lignocelulósicos se han llevado a cabo mediante termogravimetría o también conocido como análisis TGA. Este análisis consiste en calentar una mínima muestra representativa de biomasa a una tasa constante de temperatura a lo largo del tiempo, bajo condiciones controladas de atmósfera, que pueden ser u oxidante o en ausencia total de oxígeno. La muestra para este análisis debe estar pulverizada, esto con el fin de evitar en lo posible las influencias de la transferencia de masa y la transferencia de calor. Normalmente se usa tasas de calentamientos de 5, 10, 20 o 30 °C/min que van desde temperaturas de 0 °C hasta los 950 °C. A través del tiempo se va registrando la pérdida de peso de la muestra hasta llegar a un valor final en el que el peso ya no varía a lo largo del tiempo (Antunes y Figueiredo, 1999).

Este tipo de estudios permite establecer, bajo condiciones semi ideales, las cinéticas que presenta la descomposición de la biomasa, y para este caso de estudio en particular, la descomposición del bambú en atmósfera inerte. El resultado de este análisis normalmente son 2 tipos de gráficos: en la primera gráfica se representa la variación de peso en función de la temperatura que experimenta la muestra de biomasa (Δm vs t) que se conoce como la curva TGA. Una segunda grafica suele representar la derivada de la variación de peso a lo largo del tiempo en función de la temperatura ($\Delta m/\Delta t$ vs T) que se conoce como DTGA (Yang et al, 2007, p.1783). En la Figura 1.9 se puede observar un esquema

del mecanismo de la pirólisis del bambú según los polímeros de los que está constituido (Oyedum et al. 2013, p. 595).

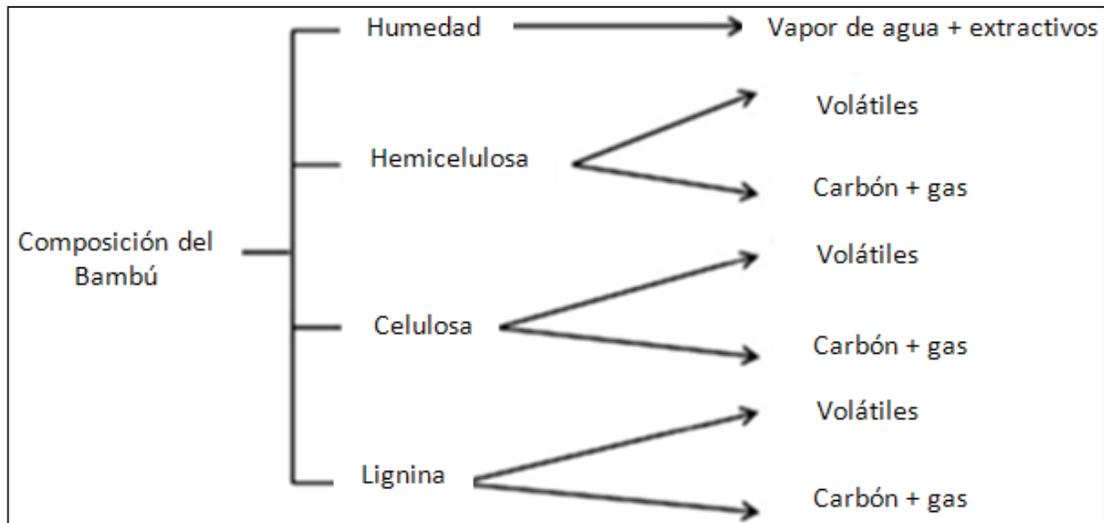


Figura 1.9. Mecanismo de la pirólisis del bambú. (Oyedun et al, 2013, p.598) modificado

Según Oyedum (2013), en la pirólisis del bambú se observan 4 etapas muy definidas que se pueden observar en las graficas TGA y DTGA. La primera etapa se da entre la temperatura inicial del ensayo o temperatura ambiente hasta los 160 °C. En esta etapa la variación de peso se debe en mayor parte a la evaporación de agua asociada a la celulosa y materiales volátiles extractivos. En esta primera etapa se registra una pérdida de peso del 7% al 10% de la masa inicial y se conoce más como etapa de pre-pirólisis. Algunos estudios no la toman en cuenta ya que señalan que solo se trata de evaporación de la humedad pero, a pesar de que existen estudios donde se ha secado el material lignocelulósico durante una semana a 110 °C, sigue registrándose esta etapa de pre pirólisis en las gráficas TGA (p. 596).

En la segunda etapa la hemicelulosa, que es el componente más inestable del bambú, comienza a descomponerse apreciándose un aumento gradual en la pérdida de masa a medida que avanza el tiempo. Esta etapa está comprendida entre los 150 °C hasta los 260 °C (Oyedum et al. 2013, p. 598). La tercera etapa de la pirólisis, según Oyedum (2013), es donde más pérdida de peso se registra. En esta etapa que va desde los 260 °C hasta los 500 °C, se termina de

descomponer la hemicelulosa mientras que la celulosa y lignina empiezan su descomposición. En esta etapa se registra la mayor pérdida de peso debido a que la celulosa contiene la mayor cantidad de componentes volátiles. En el caso de la lignina, esta empieza también su degradación pero de una manera muy lenta y gradual debido a que presenta un rango muy amplio de degradación (p. 598).

En la cuarta etapa de la pirólisis se alcanza la descomposición gradual de la lignina. Esta etapa puede estar comprendida desde los 400 °C o 500 °C en adelante, y tiene un intervalo que puede tomar valores de hasta 500 °C. En esta etapa no se registra cambio apreciable en el peso de la muestra, solo se desprende una pequeña cantidad de gases y el producto final es carbón (Oyedum et al. 2013, p. 598).

La lignina presenta un rango de descomposición que va desde la temperatura ambiente hasta los 900 °C. Debido a este amplio rango de descomposición, es la lignina la que más rendimiento en material sólido carbonáceo presenta, con un 37,4% en masa y por lo tanto representa la mayoría de masa del carbón producido (Órfao et al. 1999, p. 351).

Por otro lado, la celulosa al tener la mayor cantidad de material volátil presenta un rendimiento bajo que llega hasta el 6,5% en masa. Su rango de descomposición va desde los 315 °C hasta los 400 °C. La hemicelulosa es el componente más volátil y su descomposición se da muy fácilmente. Su rango de descomposición va desde los 220 °C hasta los 315 °C y el 20,0% de su masa es residuo sólido que perdura incluso por encima de los 900 °C (Yang et al. 2007, p. 1783).

Un esquema del análisis TGA de una muestra de bambú se puede observar en la Figura 1.10 donde se observa la curva TG a lo largo del tiempo con una velocidad de calentamiento de 10 K/min. Según Jiang (2012), el mecanismo de pirólisis del bambú solo presenta 3 etapas. La primera etapa está entre las temperaturas de 27 °C a los 177 °C con una pérdida de peso de 1,59%. Se asocia esta etapa a la pérdida de agua y humedad de la muestra. En la segunda etapa, el rango de degradación está entre los 177 °C hasta los 377 °C con una pérdida de peso de

aproximadamente el 68,69%. Esta variación se debe a la degradación de la celulosa y hemicelulosa, y una degradación parcial de la lignina. En la tercera etapa, el rango de degradación va desde los 377 °C hasta los 627 °C con una pérdida de peso de aproximadamente del 7,53%. Aquí se degradan los residuos de la lignina que se evidenció en la pérdida de peso. El residuo carbonáceo es de aproximadamente el 22,19% del peso inicial (p. 50).

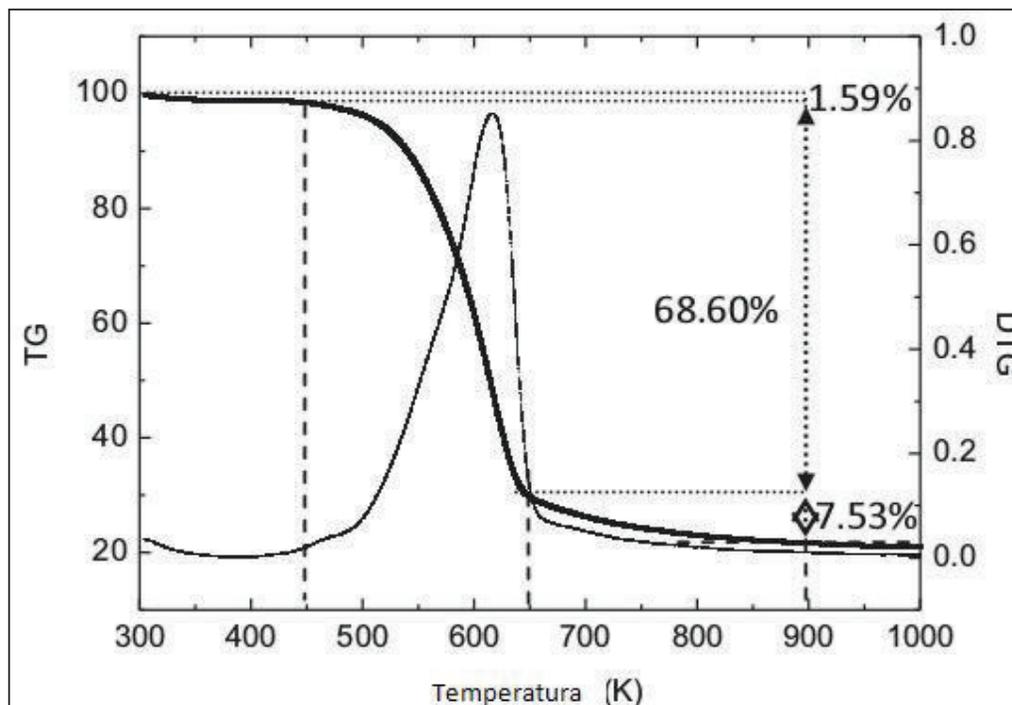


Figura 1.10. Curvas TGA de la pirólisis de bambú a diferentes tasa de calentamiento (Jiang et al, 2013) modificado

1.2.3. CINÉTICA DE LAS REACCIONES DE CARBONIZACIÓN DE LA BIOMASA

La cinética de la pirólisis de los materiales lignocelulósicos, entre ellos el bambú, no se puede describir mediante un modelo de una sola reacción, debido a que las reacciones secundarias que se dan a lo largo del proceso son las que contribuyen a la pérdida de peso del material lignocelulósico. Por lo tanto, se considera una buena aproximación descomponer a la biomasa en sus componentes principales, y considerar este mecanismo como la suma de las reacciones independientes de

cada uno de los componentes. Suponiendo que el bambú se comporta de manera similar a la madera durante la pirólisis, entonces los componentes mayoritarios de su estructura serían la celulosa, hemicelulosa y lignina (Oyedun et al. 2013, p. 598).

La mayoría de modelos cinéticos para la carbonización de biomasa se basan en el modelo de la ecuación de Arrhenius, donde se observa una dependencia entre el factor pre-exponencial (A) y la energía de activación (E_a), parámetros que son de suma importancia en el diseño de reactores para la conversión de biomasa. Este modelo también ha sido aplicado para la carbonización de otro tipo de materiales lignocelulósicos, y otro tipo de materiales sólidos compuestos como por ejemplo llantas en desuso. (Mui, Cheung, Lee y McKay, 2010, p.821). En la Ecuación 1.1 se observa la ecuación de Arrhenius:

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad [1.1]$$

Donde k es la constante de reacción, A es el factor pre-exponencial (1/min), R es la constante universal de los gases (8,314 J/K mol) y T la temperatura (K) y E_a es la energía de activación (kJ/mol). (Mui, Cheung, Lee, y McKay, 2010 p. 821).

Existen varios métodos gráficos para determinar los parámetros cinéticos de los componentes de la biomasa. La descripción cinética para la degradación de n componentes de un material sólido, que describen las curvas TGA y DTGA se describe con la ecuación 1.2. (Kim, Park, Chun, 1995, p. 508).

$$\beta \frac{dW_a}{dT} = \beta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{dW_i}{dT} = - \sum_{i=1}^n A_i \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) W_i \quad [1.2]$$

Para el cálculo de estos parámetros cinéticos, el modelo de Coats-Redfern es uno de los modelos más comunes y precisos en cuanto a la carbonización de la biomasa se refiere. La forma final del modelo se presenta en la Ecuación 1.3 de la siguiente forma:

$$\ln \left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \left(1 - \frac{2RT}{E_a} \right) \right] - \frac{E_a}{RT} \quad [1.3]$$

Donde el término β (K/min) es la tasa de calentamiento usada en el análisis TGA y el término α se llama tasa de transformación de la pirólisis, o grado de transformación de la biomasa y puede ser calculada con la expresión que se presenta en la Ecuación 1.4.

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_\infty} \quad [1.4]$$

Donde m_0 es la masa inicial de biomasa, m_∞ es la masa residual de biomasa y m es la masa a un tiempo t de biomasa. En la Ecuación 1.2, el término $E_a/RT \gg 1$, entonces el término $\ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \left(1 - \frac{2RT}{E_a} \right) \right]$ puede escribirse también como $\ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \right]$ y de esta forma realizar una gráfica linealizada de $\ln \left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2} \right]$ vs $1/T$ donde se obtiene una recta con pendiente $-E/R$ y con una intercepción en el eje $\ln(AR/\beta E_a)$ de donde se pueden obtener los parámetros E_a y A . El criterio para aceptar estos valores es que se obtenga un alto coeficiente de correlación al momento de realizar la grafica de la recta (Chen, Zhou, y Zhang, 2014, p. 314).

1.2.4. DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN INICIAL DEL MATERIAL LIGNOCELULÓSICO

Los polímeros que se encuentran en un material lignocelulósico, que son celulosa, hemicelulosa y lignina tienen, cada uno, parámetros cinéticos característicos y únicos (factor de frecuencia y energía de activación). Por tanto, durante la degradación térmica controlada, representada en el análisis TGA, hay regiones de temperaturas donde se reflejen su única descomposición, siendo así diferenciables cada uno de estos componentes durante este proceso. Por esta razón es que a partir de los datos proporcionados por las curvas TGA y DGTA se puede determinar estos parámetros cinéticos y además la composición del material usando un algoritmo ya establecido que se basa en el método diferencial

establecido por Kofstad (1957) y por Flynn y Wall (1966). (Kim et al. 1995, 508). Para obtener los parámetros cinéticos y la composición de un material con n componentes se sigue el procedimiento que se describe a continuación:

- Primero se debe identificar la región de temperaturas donde se degrada cada uno de los polímeros constituyentes, estableciendo claramente cuál de estos compuestos es el que se degrada a altas temperaturas.
- Determinar los parámetros cinéticos del componente que se degrada en la zona de altas. Para esto se puede utilizar la Ecuación 1.2. o también se puede determinar usando la Ecuación 1.3. que se menciona en esta sección que corresponde al método de Coats-Redfern modificado.
- Con los parámetros cinéticos determinados en el punto anterior se puede calcular la variación del peso con la temperatura del primer componente que se degrada según las Ecuación 1.5.:

$$W_1 = W_{1.0} \cdot \exp \left\{ -\frac{A_1 RT^2}{\beta E_1} \left[1 - \frac{2RT}{E_1} + 4 \left(\frac{RT}{E_1} \right)^2 \right] \exp \left(-\frac{E_1}{RT} \right) \right\} \quad [1.5]$$

Donde W_1 representa el peso del componente que se degrada en la región de altas temperaturas. Para determinar $W_{1.0}$ se usa la Ecuación 1.6.:

$$W_{1.0} = W_a \cdot \exp \left\{ \frac{A_1 RT_h^2}{\beta E_1} \left[1 - \frac{2RT_h}{E_1} + 4 \left(\frac{RT_h}{E_1} \right)^2 \right] \exp \left(-\frac{E_1}{RT_h} \right) \right\} \quad [1.6]$$

Donde W_a es el peso inicial de la muestra en el ensayo TGA y T_h es la temperatura a la que se degrada el compuesto en la zona de altas temperaturas.

- Una vez que se determinó el peso y la variación de peso del componente inicial, se elimina la masa y tasa de descomposición de compuesto determinado de las curvas TGA y DTGA originales, generando así una nueva curva TGA y DTGA excluyendo el aporte del compuesto que se degrada a altas temperaturas.

- Se debe repetir los procedimientos desde el primero hasta el componente “n” sobre la curva de degradación determinada en el cuarto paso. Así se determina los nuevos parámetros para el resto de componentes presentes en la estructura de la materia analizada, y nuevamente determinar su peso inicial y porcentaje de composición inicial.

Por ejemplo para la determinación del peso inicial del segundo compuesto, las ecuaciones para la determinación del peso inicial se expresan como se muestra en las Ecuaciones 1.7 y 1.8.

$$W_{2,0} = (W_a - W_1) \cdot \exp \left\{ \frac{A_2 RT_m^2}{\beta E_2} \left[1 - \frac{2RT_m}{E_2} + 4 \left(\frac{RT_m}{E_2} \right)^2 \right] \exp \left(-\frac{E_2}{RT_m} \right) \right\} \quad [1.7]$$

$$W_2 = W_{2,0} \cdot \exp \left\{ -\frac{A_2 RT^2}{\beta E_2} \left[1 - \frac{2RT}{E_2} + 4 \left(\frac{RT}{E_2} \right)^2 \right] \exp \left(-\frac{E_2}{RT} \right) \right\} \quad [1.8]$$

1.3. ACTIVACIÓN QUÍMICA CON KOH

1.3.1. CARBÓN ACTIVADO

Hay varios conceptos para definir que es un carbón activado. Por ejemplo Sütçü y Demiral (2009) señalan que el carbón activado es un material amorfo producido a partir de materiales de origen carbonáceo que tienen una alta porosidad (p. 47). Strand (2001) define al carbón activado como un término común utilizado para un grupo de sustancias adsorbentes de forma cristalina con grandes estructuras de poros internos lo que aumenta sus propiedades absorbentes (p. 4). Otro concepto señala que el carbón activado es un material altamente carbonoso con una gran cantidad de poros y microporos internos y un gran área superficial. (Ioannidou y Zabanitou, 2007, p. 1967).

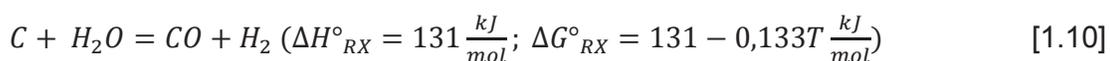
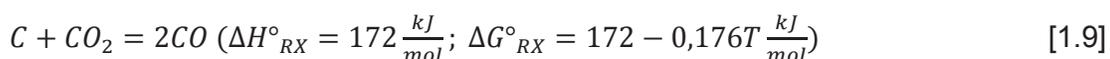
El carbón activado puede prepararse a partir de casi cualquier material orgánico con un alto contenido en carbono y preferiblemente con un bajo contenido de

materia inorgánica. La activación de un material carbonoso se da por medio de procesos físicos, que también se llaman procesos térmicos, y también mediante procesos químicos. La diferencia que existe entre estos 2 procesos de activación radica en que la carbonización y la activación son pasos independientes cuando se trata de procesos de activación física, mientras que en los procesos de activación química no siempre se dan estos 2 pasos señalados. (Prauchner y Rodríguez-Reinoso, 2012, p. 163).

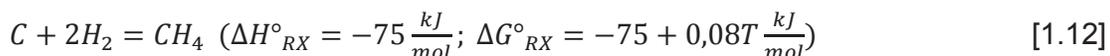
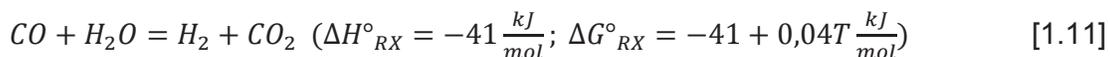
1.3.1.1. Procesos de activación física de carbón

La activación física o activación térmica del carbón consiste en oxidar parcialmente el carbón precursor con vapor de agua (H₂O) o con dióxido de carbono (CO₂). Estos gases reaccionan con los átomos de carbono, eliminándolos de la superficie interna del carbón, o de algunos microporos formados en la carbonización dando lugar a un material mesoporoso bien desarrollado. (Bandosz, 2006, p. 19).

La extracción de los átomos de la estructura del carbón se da de acuerdo a las siguientes ecuaciones estequiométricas [1.9] para el CO₂ y [1.10] para el vapor de H₂O. El uso del dióxido de carbono y el vapor de agua para eliminar átomos de carbono de la superficie no produce los mismos resultados y los mecanismos de activación no son tan simples como las ecuaciones estequiométricas mencionadas. (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 243). Por ejemplo, la reacción de la ecuación 1.5. de activación del carbón con vapor de agua también quema carbón de igual forma que la reacción de combustión, pero además sigue un patrón endotérmico, que según De la Torre (2015, p. 59) tiene los siguientes parámetros cinéticos:



Esta reacción ha sido extensamente estudiada no solo por el proceso de activación del carbón, sino porque además es la principal reacción de desplazamiento de agua. Además de la reacción heterogénea, los productos gaseosos pueden reaccionar entre sí obteniéndose de los siguientes productos que se señalan en las ecuaciones [1.11] y [1.12].



Las reacciones de activación de carbón usando vapor de agua presentan generalmente cinéticas similares para toda la mayoría de los precursores lignocelulósicos carbonosos. El orden de este tipo de reacciones puede tener valores de orden 0, de orden 1 o de orden 0,67. El valor más común de orden de reacción es de orden 1. Con este orden la reacción sigue un modelo de conversión progresiva, lo que indicando que el factor controlante en este caso viene dado por la reacción química. Posteriormente el vapor de agua se difunde a través de la red de poros y para luego reaccionar en un sitio activo interno que se encuentre en la estructura interna del carbón. Aproximadamente a temperaturas cercanas a los 1273 K (1000 °C) es donde el control químico es dominante en este proceso de activación. (Bandosz 2006, p. 20).

En cuanto a la activación física usando con dióxido de carbono, se da una reacción heterogénea endotérmica entre la estructura del carbón (sólido) y el dióxido de carbono (gas) que da lugar a la formación de monóxido de carbono como se mostró en la ecuación 1.4. Los órdenes de reacción para este mecanismo están entre el orden 0, el orden 0,67 y el orden 1 dependiendo del control de la reacción. Desde el punto de vista cinético, la activación física que usa dióxido de carbono posee una cinética más lenta que la activación que usa vapor de agua para las mismas condiciones de temperatura y presiones parciales. (Bandosz, 2006, p. 23).

1.3.1.2. Procesos de activación química del carbón

Los procesos de activación química de un carbón implica la reacción del precursor del carbón con un reactivo químico. Estos procesos se dan en atmósfera inerte a temperaturas que están entre los 673 K (400 °C) hasta los 1173 K (900 °C). Los reactivos más utilizados industrialmente son el cloruro de zinc ($ZnCl_2$), ácido fosfórico (H_3PO_4) y el hidróxido de potasio (KOH). Cada uno de estos reactivos produce un desarrollo muy diferente de la porosidad en el carbón y la viabilidad de su uso a escala industrial es altamente dependiente de recuperar de manera efectiva el reactivo para su recirculación. (Bandosz, 2006, p. 26).

El cloruro de zinc y el ácido fosfórico reaccionan directamente con la matriz del precursor carbonoso durante la etapa de carbonización y las temperaturas de activación están entre 723 K (450 °C) y hasta los 873 K (600 °C) para los dos mencionados reactivos. En el proceso de carbonización del precursor lignocelulósico el objetivo es remover los átomos de hidrógeno (H) y de oxígeno (O) del material para dejar una matriz compuesta en su mayoría solo de carbono (C). Durante este proceso cobran importancia la función que tienen el cloruro de zinc y del ácido fosfórico ya que además de ser agentes deshidratantes que eliminan el hidrógeno y oxígeno, estos también se intercalan en la estructura de la materia prima que durante la carbonización sufre una contracción debido a la pérdida de masa por altas temperaturas. A medida que se da la contracción del material los reactivos actúan a manera de plantilla generando porosidad en la estructura del carbón. Gracias a esta función es que estos reactivos mejoran el rendimiento de la carbonización y además desarrollan porosidad (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 323), en especial microporosidad cuando se trata de un material lignocelulósico. (Nakagawa, Molina-Sabio y Rodríguez-Reinoso, 2007, p. 29).

Sin embargo el proceso de activación usando hidróxido de potasio difiere de los procesos antes señalados en cuanto a mecanismo y a condiciones. Para empezar el hidróxido de potasio no reacciona con la biomasa, sino con el carbón formado luego del proceso de carbonización por medio de un proceso conocido como

exfoliación, de ahí que esta activación puede darse en dos pasos como los procesos de activación físicos. También hay un desarrollo de microporosidad en el carbón, al igual que con los reactivos anteriores, pero las temperaturas de activación son a partir de los 973 K (700 °C) posterior a las temperaturas de pirólisis de la materia prima. Es decir el KOH reacciona con el carbón de la materia prima, mas no con el precursor. (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 330).

Un paso vital en el proceso de activación química, usando cualquiera de los reactivos antes mencionados, es la etapa de impregnación del agente químico con el precursor lignocelulósico o el carbón obtenido de este. Según Marsh y Rodríguez-Reinoso(2006), la activación química de materiales lignocelulósicos es orientada principalmente a la producción de carbones activados pulverizados, entonces debido a esto el precursor debe estar finamente dividido para asegurar la homogeneidad de la mezcla con el reactivo. El proceso de impregnación del agente químico para carbones granulares es diferente y debe hacerse con sumo cuidado para lograr un contacto íntimo. (p. 324).

En dichos estudios los reactivos se disuelven en agua, se mezclaron con el precursor y se mantenía con agitación a una temperatura de 85 °C sin evaporación, de esta manera la hidratación del precursor se facilita. Una vez que la impregnación está completa, la carbonización se lleva a cabo en una atmósfera reductora o preferentemente bajo nitrógeno puro. Por último se debe hacer un lavado de los carbones obtenidos para la recuperación de los reactivos químicos. (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 324).

1.3.2. MECANISMO DE ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO

Numerosos estudios plantean el uso del KOH como agente activante a escala industrial. Choy, Barford y McKay (2005) plantean un estudio técnico económico para la instalación de una planta de carbón activado usando KOH a partir de

bambú de desecho en Hong Kong. El proyecto mencionado plantea tratar 30 t/día de bambú de desecho proveniente de la industria de la construcción. (p. 147).

Así mismo algunos autores plantean las ventajas del KOH frente a los proceso de activación física. Song et al. (2012), hacen una comparación entre la activación física con vapor de agua y la activación química usando KOH de desechos de mazorcas de maíz, llegando a la conclusión que la activación química presenta mejores resultados en cuanto a desarrollo de microporosidad, superficie específica por el método de Brunauer, Emmet y Teller (BET) y área y volumen total de poro (p. 255).

El KOH en el proceso de activación química no actúa como un agente deshidratante ni tampoco inhibe la contracción del material durante la carbonización como lo hacen los otros agentes activantes químicos ($ZnCl_2$ y H_3PO_4). El proceso de activación con KOH es muy complejo y algunos autores realizan una descripción algo detallada de los fenómenos que se dan durante la activación y de los resultados obtenidos.

González y Pliego Cuervo (2012) señalan que usando KOH como agente activante en materiales lignocelulósicos como el bambú se obtienen índices de yodo de 1 500 mg I₂/ g C.A. (p. 35). Por otro lado González-García et al. (2013) señalan que se obtienen áreas de 2 555 m²/g C.A. impregnando KOH en la *Guadua angustifolia* K. y activando a temperaturas de 973 K (700 °C) y bajo una atmósfera completamente inerte, usando gases de arrastre como el nitrógeno (N₂) y el argón (Ar). (p. 735). Sin embargo todos estos procesos tienen métodos ya definidos bajo condiciones muy controladas en laboratorio para obtener esos resultados tan significativos.

Como se mencionó antes, el proceso de impregnación es un paso fundamental para activar químicamente un carbón. Cuando se impregna el KOH o cualquier otra sal en la estructura del carbón se presentan dos fenómenos durante el proceso de activación que Marsh y Rodríguez-Reinoso (2005) los han llamado “intercalación” y “exfoliación”. En la Figura 1.11. se observa el resultado del

proceso de intercalación y exfoliación en la estructura de cristales naturales de grafito usando una sal de bromo (p. 351).

La intercalación es un proceso de transferencia de electrones. Un átomo se convierte en catión, por ejemplo $K \rightarrow K^+$ y este catión transfiere electrones a la banda de conducción π del carbón creando un enlace entre sus capas. Para el caso que se presenta en la Figura 1.11, la sal de bromo se intercala formando los complejos $Br_2 \rightarrow 2Br^-$. Existen además varios compuestos químicos que también presentan este fenómeno de intercalación, como por ejemplo el cesio (Cs), rubidio (Rb), potasio (K), litio (Li) y sodio (Na). (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 351).

Una vez que el catión está intercalado en la estructura del carbón, un calentamiento rápido hasta temperaturas entre 773 K (500 °C) y 1273 K (1000 °C) desorbe este catión de la estructura del carbón dando lugar a la formación de microporos, fenómeno denominado exfoliación. Estos fenómenos fueron descubiertos los años cincuenta cuando se observaba la degradación de los ánodos de carbono en el proceso de reducción electrolítica de los óxidos de aluminio a temperaturas de 1000 °C. (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 352).

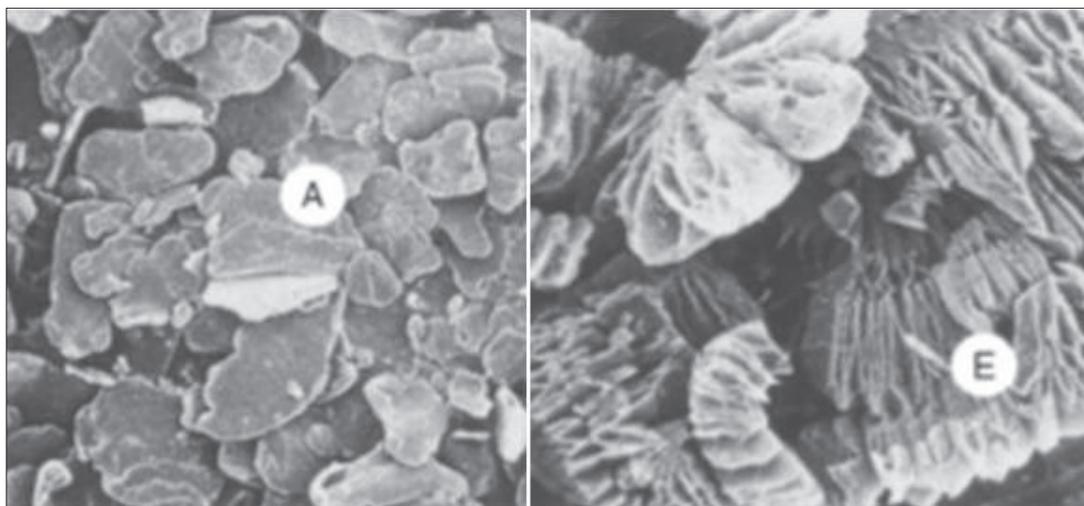


Figura 1.11. Imágenes de MEB de grafito natural impregnado con Bromo (A) sin activar y (E) activado. (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006) modificado

1.3.2.1. Química de la activación con KOH

El proceso de activación usando KOH es el resultado de cinco factores críticos que ocurren simultánea y consecutivamente que se describen a continuación:

- El primer paso es la reducción desde hidróxido a metal libre.
- El segundo paso es el enlace del metal libre entre las capas del carbón mediante un proceso de intercalación.
- En el tercer paso se da una ligera expansión debido a la intercalación del átomo libre en las capas del carbón.
- En el cuarto paso a medida que se da un calentamiento progresivo, se da la remoción del átomo de las capas del carbón debido al fenómeno de exfoliación, dando lugar a la formación de poros. Este proceso es altamente dependiente de la temperatura a la que se somete y del contenido de KOH en la impregnación.
- En el quinto paso se observa un proceso de activación física debido a oxidaciones parciales provocadas principalmente por el oxígeno proveniente del KOH, pero el desarrollo de porosidad en este paso es, en la mayoría de ocasiones, despreciable.

Este proceso que se describe también puede ser aplicado para otro tipo de compuestos alcalinos como por ejemplo el hidróxido de sodio (NaOH). (Marsh y Rodriguez-Reinoso, 2006, p. 356).

Sin embargo las reacciones que se dan durante el proceso de activación química no están completamente dilucidadas. Existen varias teorías que describen un ciclo del KOH durante la activación y concluyen que existe la formación de carbonato de potasio (K_2CO_3) durante este proceso. Según Terán-Díaz et al. (2003) durante

la activación química con KOH tres reacciones químicas tienen lugar y se describen a continuación.

- Formación de K_2CO_3 : el K_2CO_3 se forma según la reacción 1.8.



- La formación de CO_2 durante la reacción del K_2CO_3 con el carbón se da a temperaturas de 750 K (477 °C). A estas temperaturas se forma en la superficie del carbón un complejo (C-O-K). Este complejo se comporta a manera de sitio activo en el proceso de activación.
- La formación de CO se da alrededor de los 920 K (647 °C) cuando reacciona el K_2CO_3 y el K_2O con el carbón según las reacciones 1.9 y 1.10.



Grandes cantidades de KOH rompen la base del carbón y la pérdida de ciertos grupos funcionales de superficie formados como son anillos aromáticos, quinonas, carbonilos. (p. 174). Basado en estas reacciones se propuso un ciclo que experimenta el KOH durante el proceso de activación que se muestra en la Figura 1.12.

Sin embargo en el ciclo que proponen Hu y Vansant (1995) no consideran la formación de K_2CO_3 . Cuando la materia prima es puesta en contacto con el KOH en solución acuosa, se da el proceso de intercalación de los cationes K^+ o del KOH en las capas del carbón. Posterior a la impregnación se propone un proceso de deshidratación a 300 °C donde se forma K_2O y debido a esto hay una expansión de las capas del carbón. A partir de los 700 °C en adelante se da la formación de potasio metálico debido a la reducción del K_2O por el carbón a alta temperatura. Por efecto de esto hay una degradación del carbón en su estructura

interna dando lugar a la formación de los poros. Por último concluye que el desarrollo de la porosidad es dependiente de la cantidad de KOH usado en el proceso. (p. 607).

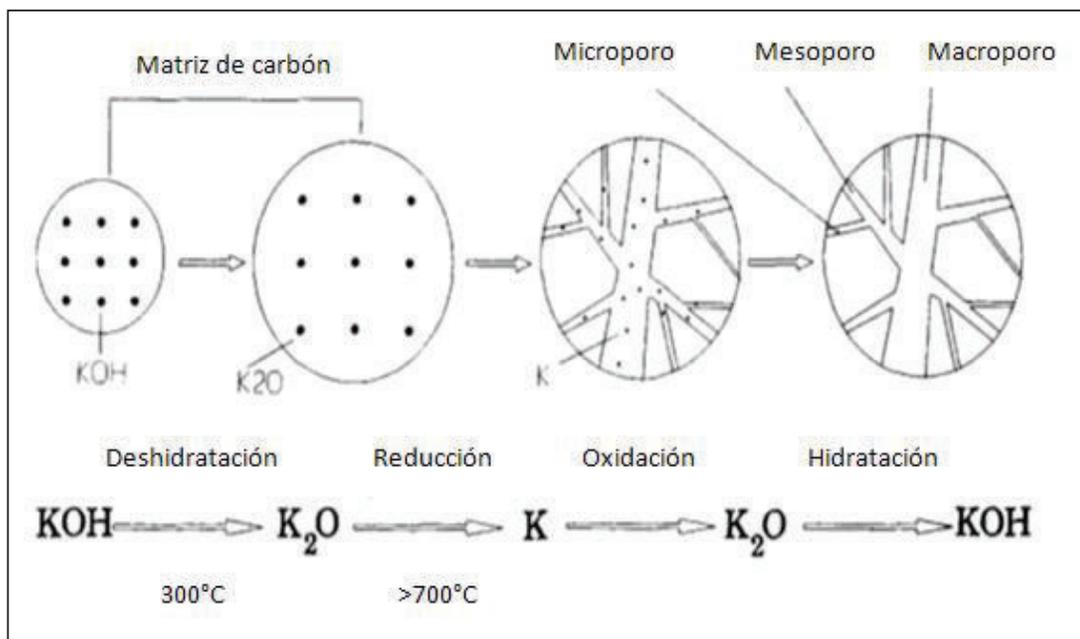


Figura 1.12. Ciclo del KOH durante el proceso de activación química. (Hu y Vansant, 1995, p.608) modificado

Como se observa en las reacciones y mecanismos antes mencionados, el hidróxido de potasio no reacciona con el precursor, sino reacciona con el carbón resultante obtenido del proceso de carbonización del mismo, dando lugar así a l desarrollo de la porosidad. Para activar un material lignocelulósico usando KOH y formar carbón activado, el proceso puede darse en dos pasos, que serían carbonización y activación, de la misma forma que se hace en procesos de activación físicos. (Marsh y Rodríguez-Reinoso, 2006, p. 357).

1.3.2.2. Efecto de la relación g KOH/ g Carbón en la activación química

El efecto que tiene la cantidad de KOH utilizado en la activación se determina evaluando un parámetro que evalúa la masa de KOH empleado sobre la masa de carbón para activar (g KOH/ g C). En la mayoría de estudios realizados se

observa que con el incremento de la relación g KOH/ g C aumenta el desarrollo de la porosidad, es decir, que si se usa más gramos de KOH por cada gramo de carbón para activar se logra un grado de activación mayor. Por ejemplo Hu y Vansant (1995) señalan que la capacidad de adsorción del carbón y su microporosidad aumentan a medida que aumenta la relación g KOH/ g C. desde cero hasta tres, pero sin embargo el aumento no es muy significativo cuando pasa de la relación dos a la tres. (p. 606). El mismo efecto se observa con el volumen de los microporos. A bajas tasas de g KOH/ g C. el volumen total de los microporos es bajo, pero sin embargo, altos valores de la relación g KOH/ g C. desintegran el carbón en polvos finos e incluso pueden llegar a destruir la matriz misma del carbón (Marsh y Rodriguez-Reinoso, 2006, p. 329). La cantidad de KOH que se usa en la activación también influye en la distribución de poros que se desarrolla en la superficie del carbón. Según Wu et al. (2004) los mejores resultados obtenidos al activar telas pre carbonizadas se hallaron a una determinada relación KOH/carbón en peso. En la Figura 1.13 se observa la influencia de la relación KOH/carbón en la activación química. (p. 207).

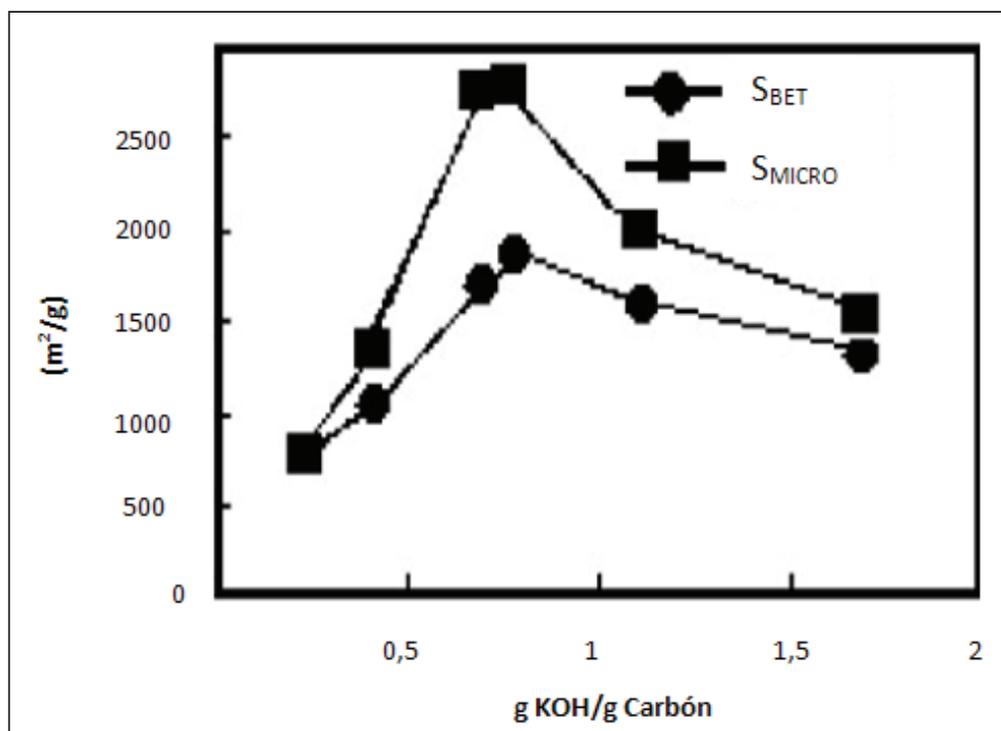


Figura 1.13. Influencia de el factor (g KOH/g Carbón) en la superficie BET de los carbones activados (Wu et al. 2004, p. 206) modificado

En este caso fue del 75%, es decir g KOH/ g C es igual a 0,75. A partir de este punto empieza una disminución tanto en el área de los microporos como en la superficie BET. Sin embargo otros materiales presentan altos grados de activación a relaciones del 400% (g KOH/ g C=4) y del 600% (g KOH/ g C=6), lo que también indica que cada material precursor del carbón tiene condiciones definidas a las que se activa químicamente. (Wu et al, 2004, p. 208).

1.3.2.3. Efecto de la temperatura en la activación química

La temperatura de activación es el parámetro más importante a evaluar durante el proceso de activación usando KOH. Marsh y Rodriguez-Reinoso (2006) señalan que las temperaturas a las cuales se desarrolla de manera óptima la porosidad están a partir de los 700 °C, valores superiores a las que se da la carbonización de la materia prima. Cuando las temperaturas están entre los 850 °C y 900 °C se alcanza el mayor grado de activación, considerándose este rango de temperaturas como crítico para la activación. (Marsh y Rodriguez-Reinoso, 2006, p.328).

Sütcü y Demiral (2009), realizaron varias activaciones químicas de materiales lignocelulósicos como endocarpios de níspero usando hidróxidos de sodio (NaOH) y de potasio (KOH) en una relación g KOH/ g C. de 2/1 y a diferentes temperaturas de activación que se encontraban entre los 600 °C y los 1 000 °C durante un tiempo de 1 hora. (p. 48). Los resultados obtenidos de dichas experimentaciones en cuanto a superficie BET y área superficial de los microporos desarrollado se observan en las Figuras 1.14. y 1.15.

En la Figura 1.14. se observa como incrementa la superficie BET del carbón activado producido a medida que también aumenta el valor de la temperatura. Sin embargo el comportamiento de los 2 agentes activantes (KOH y NaOH) es diferente ya que, mientras la superficie específica que desarrollan los carbones activados donde se usó KOH como agente activante sigue en aumento incluso al alcanzar temperaturas de 1 000 °C. Por otro lado los carbones activados que

usaron NaOH como agente activante alcanzan su máximo valor entre los 700 °C y 800 °C. Más arriba de estas temperaturas, los valores BET y superficie de microporos empiezan a disminuir sus valores.

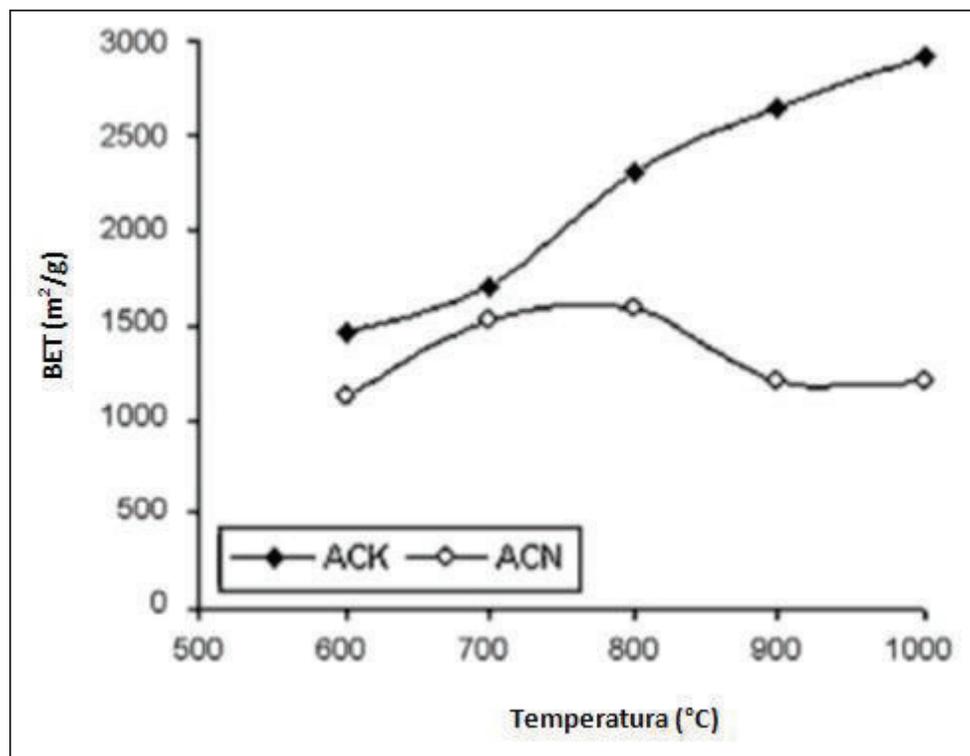


Figura 1.14. Influencia de la temperatura en el la superficie BET de carbones activados de endocarpios de níspero usando KOH (ACK) y NaOH (ACN). (Sütcü y Demiral, 2009, p.49) modificado

Un comportamiento similar se observa en el desarrollo del área superficial de los microporos usando estos dos reactivos para la activación de los mismos endocarpios de níspero que se observa en la Figura 1.15.

Los experimentos realizados por Sütcü y Demiral (2009) demuestran que el grado de activación de los carbones es altamente dependiente de la temperatura de activación determinada, pero sin embargo solo se puede alcanzar un máximo grado de activación para cada material lignocelulósico. A partir de esta temperatura determinada, como se observa en la Figura 1.14. y en la Figura 1.15. empieza un descenso en los valores de superficie BET y de área superficial de los microporos. Si se hace referencia al área superficial de los microporos, se

alcanza el máximo valor a los 900 °C, si se usa KOH como agente activante, alcanzando áreas de alrededor de 2 000 m²/g.

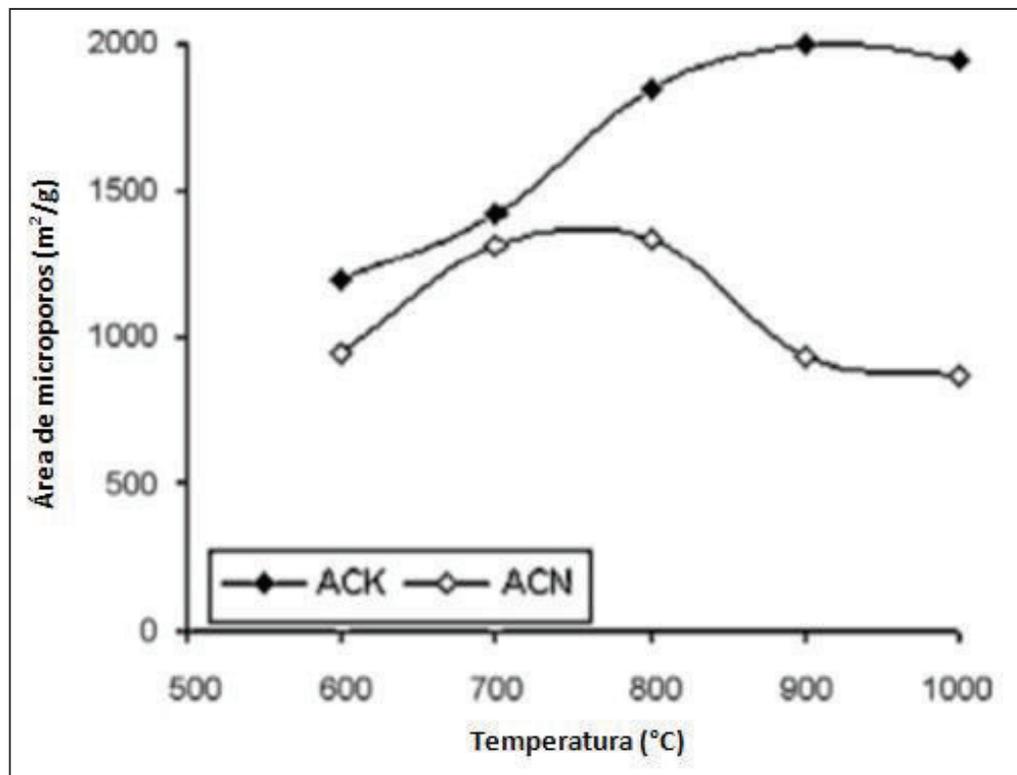


Figura 1.15. Influencia de la temperatura en la superficie de los microporos de carbones activados de endocarpios de níspero usando KOH (ACK) y NaOH (ACN). (Sütcü y Demiral, 2009, p. 49). modificado

En cuanto a la activación usando NaOH como agente activante, el máximo valor de superficie de microporos se alcanza entre los 700 °C a 800 °C de temperatura. Se alcanzan valores de alrededor de 1 400 m²/g de superficie de microporos. Sin embargo existe una limitante adicional en este análisis además del descenso de la superficie específica de los carbones activados. Además existen problemas asociados al rendimiento de estos procesos ya que a mayor temperatura de activación, el rendimiento de carbón obtenido disminuye. Por ejemplo a temperaturas de activación entre 600 °C y 900 °C el rendimiento en masa de carbón se ubica entre el 80% y el 40% respectivamente, esto con respecto a la masa del carbonizado inicial. Considerando esto es muy importante analizar y encontrar un punto de equilibrio entre la temperatura a la que se desarrolla la

mayor área superficial y a la que no se tenga tantas pérdidas por carbonización.
(p. 49)

1.3.2.4. Efecto del tiempo en la activación química

El efecto del tiempo en la activación química tiene un análisis similar al del efecto de la temperatura. León, Castro, Arguello y Rincón (1989) realizaron activaciones de cuesco de palma y de carbón El Cerrojón usando KOH y realizaron un análisis de la influencia del tiempo en la activación de estos 2 carbones. Obtienen carbones activados con áreas superficiales de 900 m²/g para el carbón El Cerrojón y de 850 m²/g para el carbón de cuesco de palma. Sin embargo, el carbón El Cerrojón alcanza estos valores pasadas las 4 horas de activación, mientras que el carbón de cuesco de palma alcanza el valor mencionado un poco después de las 2 horas. A partir de estos tiempos, en los dos carbones se observa una disminución del área superficial. (p. 72).

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LA CAÑA GUADUA PROVENIENTE DE LA ZONA DE NANEGAL, PROVINCIA DE PICHINCHA

En el presente proyecto se utilizaron cañas guaduas provenientes de la zona de Nanegal, población ubicada al noroccidente de la provincia de Pichincha, a 70 km de la ciudad de Quito que se las secaron a temperatura ambiente por alrededor de una semana. Posteriormente se realizaron ensayos en laboratorio para determinar sus propiedades físicas y químicas.

2.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CAÑA GUADUA

En la caracterización física de la caña guadua se determinó el contenido de humedad, material volátil, carbón y ceniza. Para esto se utilizó el procedimiento descrito en el Test Method for Activated Carbon (CEFIC, 1986).

2.1.1.1. Determinación de humedad

Para la determinación de humedad se pesó en una balanza SARTORIUS TE1245 aproximadamente 1 g de aserrín de caña guadua en un crisol de porcelana. La muestra fue colocada en una estufa MEMMERT a 110 °C por 2 h. Se registró el peso inicial de la muestra (M_i) y el peso final de la muestra (M_f). El porcentaje de humedad se calcula con la Ecuación 2.1:

$$\%H = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad [2.1]$$

Donde:

M_i : peso inicial de la muestra (g)

M_f : peso final de la muestra (g)

2.1.1.2. Determinación del contenido de material volátil

Para la determinación de material volátil se pesó aproximadamente 1 g de muestra de aserrín de caña guadua en un crisol de cerámica con tapa. Esto se colocó en la mufla eléctrica Lindenberg/Blue BF51728C-1 a una temperatura de 950 °C durante 7 minutos. Se extrajo el crisol de la mufla y se lo enfrió a temperatura ambiente en un desecador. Se registró la masa del crisol (M_c), masa de la muestra (M_m), y la masa del crisol más la muestra luego de los 7 minutos de tratamiento térmico a 950 °C (M_{7m}). El porcentaje de material volátil se calcula con la siguiente Ecuación 2.2.:

$$\%volátiles = \left[1 - \left(\frac{M_{7m} - M_c}{M_m} \right) \right] \times 100 \quad [2.2]$$

Donde:

M_c : Masa del crisol (g)

M_m : Masa inicial de la muestra (g)

M_{7m} : Masa final de la muestra más el crisol (g)

2.1.1.3. Determinación del contenido de carbón fijo y cenizas

Para determinar el contenido de carbón fijo y cenizas se colocó en la mufla Lindenberg/Blue BF51728C-1 una muestra de caña guadua sin presencia de material volátil en un crisol a una temperatura de 950 °C durante 2 horas. Luego de esto se extrajo el crisol y se lo enfrió a temperatura ambiente en un desecador.

Se registró la masa inicial de la muestra sin material volátil (M_{7m}), la masa del crisol más la muestra luego de las 2 horas de tratamiento térmico a 950 °C (M_{2h}). El porcentaje de carbón fijo se calcula con la Ecuación 2.3.:

$$\% \text{carbón fijo} = \frac{M_{7m} - M_{2h}}{M_m} \times 100 \quad [2.3]$$

Donde:

M_{7m} : Masa del crisol más la muestra sin material volátil (g)

M_{2h} : Masa final del crisol más la muestra (g)

M_m : Masa inicial de la muestra (g)

El porcentaje de cenizas que tiene la materia prima se calculó mediante diferencia, como se ve en la Ecuación 2.4.:

$$\% \text{cenizas} = 100 - \% \text{material volátil} - \% \text{carbón fijo} \quad [2.4]$$

2.1.1.4. Determinación de la densidad aparente y real de la caña guadua

Para la determinación de la densidad aparente se utilizó una probeta graduada de 250 mL y se registró su peso (M_P). Posteriormente se llenó la probeta con la muestra hasta llenar un volumen de 100 mL y se registró también ese peso (M_{P+M}). La densidad aparente de la caña guadua se calcula según la Ecuación 2.5.:

$$\rho_{\text{aparente}} = \frac{M_{P+M} - M_P}{100} \quad [2.5]$$

Donde:

M_P : Masa de la probeta vacía (g)

M_{P+M} : Masa de la probeta más la muestra (g)

Para el cálculo de la densidad real se usó un picnómetro de 25 mL de capacidad. Se registro el peso del picnómetro vacío (M_v). Posteriormente se colocó exactamente 1 g de muestra al interior del picnómetro y se registró su peso (M_{v+m}). Inmediatamente se llenó el picnómetro con agua destilada y se registro también este peso (M_{v+m+a}). Finalmente se tomó el peso del picnómetro solamente lleno con agua destilada (M_{v+a}). Para calcular la densidad real se usó la Ecuación 2.6.:

$$\rho_{real} = \frac{1}{1 + \left(\frac{M_{v+a} - M_{v+m+a}}{M_{v+m} + M_v} \right)} \quad [2.6]$$

Donde:

M_v : Masa del picnómetro vacío (g)

M_{v+m} : Masa del picnómetro más 1 g de muestra (g)

M_{v+m+a} : Masa del picnómetro más 1 g de muestra y lleno de agua destilada (g)

M_{v+a} : Masa del picnómetro lleno de agua destilada (g)

2.1.1.5. Determinación del ángulo de reposo de la caña guadua

Para la determinación del ángulo de reposo de la caña guadua se construyó una pila cónica usando un embudo. A través de la boca del embudo, que tiene un tamaño de 4 cm, se hace pasar los trozos de caña guadua para que se depositen sobre una superficie plana hasta formar una pila cónica. Se midió el diámetro de la pila y su altura para poder determinar el ángulo de reposo del material.

2.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA CAÑA GUADUA

A continuación se mencionan los análisis realizados para la caracterización de la caña guadua.

2.1.2.1. Análisis termogravimétrico de la caña guadua

Una muestra pulverizada y representativa de caña guadua fue analizada en la termobalanza TGA Shimadzu del laboratorio del CIAP de la EPN para realizar un análisis termogravimétrico. En el equipo se colocó alrededor de 6 mg de caña guadua en la bandeja toma muestra. Se programó el análisis con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, desde temperatura ambiente hasta 950 °C, con un flujo másico de nitrógeno al interior de la cámara de 25 mL/min para mantener una atmósfera inerte al interior de la cámara toma muestras.

Bajo estas condiciones se obtiene una gráfica donde se observó la variación de peso con la variación de temperatura y la derivada del peso con respecto al tiempo de la muestra de caña en función del tiempo.

2.1.2.2. Determinación de la presencia de metales en la caña guadua

Se determinó la presencia de aluminio, silicio, calcio, magnesio, sodio y potasio usando la técnica de espectrofotometría por absorción atómica en el equipo Perkin Elmer AAnalyst 300. Para esto es necesaria la solubilización de la muestra de cenizas. En primer lugar se debe tener una muestra de las cenizas de la caña guadua y a continuación se procede a la disgregación de esta muestra. El método utilizado se describe a continuación.

Se pesó alrededor de 0,100 g de muestra de cenizas de la caña guadua en un crisol de porcelana. Se añade 5 mL de HNO₃ y se calentó hasta que se secó totalmente el ácido. Posteriormente se colocó el crisol nuevamente en la mufla Lindenberg/Blue BF51728C-1 a 850 °C durante 30 min. Nuevamente se añadió 5 mL de HNO₃ hasta lograr la disolución total de las cenizas. Por último se aforó la disolución con agua destilada hasta 50 mL.

2.1.2.3. Caracterización de la estructura de la caña guadua

Una muestra de caña guadua pulverizada fue analizada usando microscopía electrónica de barrido en el equipo Tescan-Vega. Las muestras fueron introducidas en la cámara porta muestras del microscopio y se capturaron imágenes de la estructura de la materia prima a diferentes grados de aumento.

2.2. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA CARBONIZACIÓN DE LA CAÑA GUADUA

Los parámetros que se evaluaron en la carbonización de la caña guadua fueron: temperatura de carbonización, tiempo de carbonización y agitación. Para esto se realizaron ensayos a escala laboratorio en la mufla Lindenberg/Blue BF51728C-1 y a escala piloto en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera.

2.2.1. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO PARA LA CARBONIZACIÓN DE LA CAÑA GUADUA

Las pruebas a escala laboratorio para la carbonización de la caña guadua se las realizó en crisoles de arcilla. En la Figura 2.1 (a) y (b) se observan fotos de los crisoles para los ensayos señalados.

En cada crisol se colocó alrededor de 5,0 a 8,0 g de caña guadua triturada, con un tamaño de partícula de entre 0,25 a 0,50 cm. Se cubrió las muestras de caña guadua con una capa de 3 a 5 cm de aserrín común de pino para generar una atmósfera reductora. Estos crisoles fueron introducidos en la mufla a temperaturas de 350 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C y 650 °C por tiempos de 1 y 2 horas. Cada una de las muestras obtenidas fue caracterizada analizando la cantidad de material volátil, carbón fijo y cenizas según los procedimientos descritos en las secciones 2.2.1.2 y 2.2.1.3.



Figura 2.1. Esquemas de los crisoles con (a) muestra de caña guadua y (b) tapada con aserrín para la carbonización de la caña guadua

Al tiempo y temperatura a la que se obtenga el mayor porcentaje de carbón fijo se denominó temperatura de carbonización. A esta temperatura se realizó un ensayo a escala piloto para evaluar la carbonización de la caña guadua a una escala semi industrial.

2.2.2. PRUEBA A ESCALA PILOTO PARA LA CARBONIZACIÓN DE LA CAÑA GUADUA

La prueba a escala piloto de la carbonización de la caña guadua se la realizó en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera que se observa en la Figura 2.2. El horno Nichols Herreshoff es un horno de solera, que usa gas licuado de petróleo (GLP) como combustible, que tiene la posibilidad de trabajar en lecho fijo o en lecho agitado en la cámara del horno y también la posibilidad de establecer atmósfera oxidante o reductora al interior del horno. Con base en el mejor resultado de temperatura de carbonización obtenido en las pruebas de laboratorio, se realizaron dos ensayos a escala piloto para evaluar la carbonización de la caña guadua, uno usando agitación al interior de la cámara del horno y otro usando un lecho fijo.

El horno piloto Nichols Herreshoff mono solera es un horno piloto que tiene la capacidad de controlar la atmósfera al interior de la cámara porta muestras mediante el factor lambda (λ). Este factor es la relación entre el flujo de aire y el flujo de GLP que ingresa al quemador del horno. Si se establece un factor lambda $\lambda > 1,0$ se tiene una atmósfera oxidante al interior de la cámara del horno. Por otro lado si se establece un factor lambda $\lambda < 1,0$ se tiene una atmósfera reductora al interior del horno. En a Figura 2.2. se observa una foto del horno piloto Nichols Herreshoff mono solera usado. Al alcanzar la temperatura de carbonización se estableció un factor lambda $\lambda = 0,9$ al interior de la cámara para tener atmósfera reductora y así favorecer la formación de carbón de caña guadua alimentada al horno.



Figura 2.2. Horno piloto Nichols Herreshoff mono solera

En el ensayo sin agitación se carbonizó 2 kg de caña guadua troceada, con un tamaño entre 0,5 y 1,0 cm. La muestra se colocó en un plato cerámico al interior de la cámara del horno a la temperatura establecida, como se muestra en la Figura 2.3. Se tomaron muestras cada 15 minutos del carbón producido durante el ensayo. A cada muestra se la caracterizó determinando el contenido de material volátil, carbón fijo y cenizas, según el procedimiento descrito en las secciones 2.3.1.2 y 2.3.1.3.



Figura 2.3. Caña guadua troceada al interior del horno piloto mono solera Nichols Herreshoff con el sistema sin agitación

Para el ensayo donde se usó agitación al interior de la cámara del horno se carbonizó 4 kg de caña guadua troceada, con un tamaño entre 0,5 y 1 cm. En la Figura 2.4. se presenta una imagen donde se observa la muestra de caña guadua al interior del horno con la agitación.



Figura 2.4. Caña guadua troceada al interior del horno piloto mono solera Nichols Herreshoff con el sistema de agitación

La muestra se colocó en la cámara del horno, ya encendido y operando a la temperatura de carbonización establecida. Se tomaron muestras del carbón producido cada 15 minutos. A cada muestra se la caracterizó determinando el contenido de material volátil, carbón fijo y cenizas, según el procedimiento descrito en las secciones 2.2.1.2 y 2.2.1.3.

Varias muestra del carbón de caña guadua fueron analizados usando microscopía electrónica de barrido en el equipo Tescan-Vega. Las muestras fueron introducidas en la cámara porta muestras del microscopio y se captaron imágenes de la estructura de la materia prima a diferentes grados de aumento.

2.3. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO DEL CARBÓN DE LA CAÑA GUADUA

Los parámetros que se evaluaron en la activación química del carbón de la caña guadua con hidróxido de potasio fueron: relación de gramos de hidróxido de potasio por gramo de carbón de caña guadua (g KOH/g CCG), temperatura de activación, tiempo de activación. Para esto se realizaron ensayos a escala laboratorio en la mufla Lindenberg/Blue BF51728C-1 y a escala piloto en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera.

La impregnación de hidróxido de potasio en el carbón de caña guadua se hizo por medio de soluciones acuosas. En un vaso de precipitación de 500 mL se colocaron entre 5 a 10 g de carbón de caña guadua y se le añadió hidróxido de potasio grado reactivo en relaciones de 1/1, 2/1 y 3/1 gramos de KOH por cada gramo de carbón de caña guadua (g KOH/ g C.C.G.). A esta mezcla se le añadió de 150 a 200 mL de agua destilada, hasta lograr que todo el KOH se solubilice y todo el carbón se moje con la solución. A esta mezcla se la calentó hasta temperatura de ebullición y se agitó durante 4 horas. Los carbonos impregnados

fueron filtrados de la solución y secados a 110 °C durante 8 horas. (González-García et al., 2013, p. 732; Marsh y Rodríguez Reinoso, 2006, p 327.)

2.3.1. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO PARA LA ACTIVACIÓN QUIMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO DEL CARBÓN DE LA CAÑA GUADUA

Las pruebas a escala laboratorio de activación química del carbón de caña guadua se las realizó en crisoles de arcilla. En cada crisol se colocó alrededor de 3 a 5 g de carbón de caña guadua impregnado con hidróxido de potasio a razones de 1/1, 2/1 y 3/1 (g KOH/g C.C.G). Se cubrió las muestras de caña guadua con una capa de 3 a 5 cm de aserrín común de pino para generar una atmósfera reductora. El crisol fue introducido en la mufla a temperaturas de 600 °C, 700 °C, 800 °C y 900 °C por un tiempo de 2 horas.

Cada una de las muestras obtenidas fue caracterizada mediante la determinación del índice de yodo. A la temperatura y relación (g KOH/ g CCG) a la que se obtenga el mayor índice de yodo se les denominó temperatura de activación y relación óptima de activación. A esta temperatura y relación óptima se realizaron ensayos a tiempos de 1, 2 y 3 horas. Nuevamente se caracterizó los carbones producidos determinando el índice de yodo. Al tiempo al que se obtuvo el mayor índice de yodo se lo denominó tiempo de activación. A la temperatura, tiempo y relación optima de activación se realizaron un ensayo a escala piloto para evaluar el proceso de activación química a escala semi industrial.

2.3.2. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE YODO

Para determinar el índice de yodo se siguió el procedimiento descrito por el Council for Mineral Technology (CEFIC, 1987) y por la norma NTE INEN 1 988:94 (1995b). Se pesó 1 g de muestra de carbón activado pulverizado con un tamaño menor a los 45 µm. Se colocó la muestra en un matraz erlenmeyer de 250 mL, y

se añadió 10 mL de ácido clorhídrico (HCl) al 5% hasta que se humedezca todo el carbón. Se calentó la mezcla en una plancha de calentamiento hasta alcanzar la temperatura de ebullición y se lo mantuvo así por 30 s exactamente. Luego se enfrió a temperatura ambiente. Posteriormente se añadieron 100 mL de una solución de yodo 0,1 N (I_2) y se agitó vigorosamente durante 30 s exactamente. Inmediatamente se filtró el contenido a través del papel filtro Waltman #42, descartando los primeros 10 a 15 mL. Se tomó una alícuota de 50 mL y se tituló con una solución de tiosulfato de sodio 0,1 N ($Na_2S_2O_4$) hasta que la solución adquiriera un color amarillo. Luego se añadió 3 gotas de una solución de almidón de 1 g/L como indicador. Se continuó la titulación hasta que el color azul del indicador desapareciera y la solución se torne completamente transparente. El índice de yodo es función del volumen usado de tiosulfato de sodio 0.1 N ($Na_2S_2O_4$) en la titulación. A menor volumen usado para la titulación, es mayor el índice de yodo obtenido.

2.3.3. PRUEBAS A ESCALA PILOTO PARA LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO DEL CARBÓN DE LA CAÑA GUADUA

La prueba a escala piloto de la activación química del carbón de caña guadua se la realizó en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera. Al alcanzar la temperatura de activación, se estableció un factor $\lambda=0,9$ para tener las condiciones de activación del carbón.

Una vez que se alcanzó la temperatura de activación, se colocó 1 kg de carbón de caña guadua impregnado con hidróxido de potasio en un plato cerámico al interior de la cámara del horno. Se tomó una muestra del carbón activado cada 30 minutos durante todo el ensayo hasta cumplir con el tiempo de activación determinado. Al final del ensayo se sacó la muestra de carbón de la cámara del horno y se enfrió hasta alcanzar temperatura ambiente. A cada muestra de carbón activado producido se la caracterizó determinando el índice de yodo según el

procedimiento descrito en la sección 2.3.2 para evaluar como varía la superficie específica del carbón a medida que avanza el ensayo de activación.

Adicionalmente a este ensayo, también se caracterizó el carbón activado mediante otras técnicas, como la determinación del índice de azul de metileno para evaluar la mesoporosidad del carbón y también a través del índice de decoloración de azúcar para evaluar la macoporosidad que ha desarrollado el carbón activado a través del proceso de activación. Se tomaron además fotos mediante microscopía electrónica a diferentes grados de aumento para evaluar la variación en la superficie del carbón activado luego del proceso de activación química y además para observar el desarrollo de los poros durante la activación.

Adicionalmente se caracterizó a los carbones obtenidos mediante un análisis de superficie específica BET para determinar las isothermas de adsorción y desorción del carbón activado y además obtener su área específica. Adicional a este ensayo también se caracterizó el carbón mediante espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier para analizar los grupos funcionales que se formaron en la superficie del carbón activado.

2.3.3.1. Índice de azul de metileno

La determinación de índice de azul de metileno es un indicador para determinar la mesoporosidad que posee un carbón activado. Este análisis se lo realizó según el procedimiento señalado por el Test Methods for Activated Carbon (CEFIC, 1986). Para esto se preparó 2 soluciones acuosas de ácido acético ($C_2H_4O_2$): la primera con una concentración al 5,00 % (v/v) y la segunda con una concentración al 0,25 % (v/v).

El análisis parte de una solución madre. Esta solución contiene 1,2 g/L de azul de metileno en ácido acético al 5,00 %. Para conseguir esta concentración se pesó 1,2 g de azul de metileno y luego se aforó a 1 L en un matraz aforado con la solución de ácido acético al 5,00 %. La muestra de carbón activado debe estar pulverizada para realizar el ensayo. Debido a esto es reducida de tamaño hasta

una malla menor de 45 μm . Se toma exactamente 1,0 g de muestra de carbón activado y se añade 25 mL de la solución madre preparada anteriormente. Esta mezcla se agita mecánicamente durante 30 min y se filtra con un papel Whatman N° 44, descartando los primeros 5 mL.

Luego al filtrado se le diluirá, tomando una alícuota de 1 mL del filtrado en 100 mL de la solución de ácido acético al 0,25%. Se determinaron los gramos de azul de metileno adsorbidos por cada 100 g de carbón activado a través de la absorbancia medida de la solución con la muestra. La absorbancia de cada una de las soluciones se midió en un colorímetro Corning Colorimeter 252 a una longitud de onda de 600 nm. También se realizó una curva de calibración con diluciones de la solución madre en ácido acético al 0,25 % de 1:600, 1:300, 1:150 y 1:120. A cada solución se midió la absorbancia a 600 nm.

2.3.3.2. Decoloración de jarabe de azúcar

La determinación del índice de decoloración de azúcar es un indicador de la macro porosidad que posee un carbón activado. Este análisis se lo realizó según el procedimiento señalado por Coca Cola Quality Systems (2002).

Para la determinación del índice de decoloración de azúcar primero se parte de una solución madre de sacarosa de 60 °Brix. Esta solución se la obtiene mezclando 60,0 g de azúcar morena con 40,0 g de agua usando agitación continua hasta conseguir la disolución total del azúcar en el agua. De esta solución se tomó 100,0 g y se mezcló exactamente con 0,6 g de la muestra de carbón activado pulverizado. Se puso en contacto durante 45 min, a 80 °C y con agitación continua. La solución se filtró usando papel filtro Whatman N° 42 cuantitativo, en un embudo Buchner con matraz kitasato y bomba de vacío. Se usó una proporción 0,6 g de tierras filtrantes por cada 100 g de solución para ayudar a la filtración del jarabe. De la muestra filtrada se midió la absorbancia en el colorímetro Corning Colorímetro 252 a longitudes de onda de 430 nm y 710nm.

Se determinó las unidades básicas de referencia (UBR) mediante la Ecuación 2.7.:

$$UBR = \frac{(1000 \times Abs_{430nm}) - (2 \times Abs_{710nm})}{0,7718} \quad [2.7]$$

El valor de UBR para los jarabes preparados antes de ser decolorados debe presentar valores entre los 195 a 205 UBR.

2.3.3.3. Caracterización de los grupos funcionales de superficie mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier

Para la determinación de los grupos funcionales desarrollados en la superficie del carbón activado se usó un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier. Este espectrómetro trabaja desde números de onda que van desde 400 cm^{-1} hasta los 4000 cm^{-1} .

2.3.3.4. Determinación de la superficie específica, tamaño y volumen de poro del carbón activado a escala piloto

La determinación de la superficie específica BET, tamaño y volumen de poro se la realizó mediante ensayos de adsorción de nitrógeno a 77,15 K en el equipo BET ASAP 2010 V4.01 Beta.

2.3.3.5. Caracterización de la estructura del carbón activado producido a escala piloto

Varias muestras del carbón activado químicamente usando KOH a partir de la caña guadua fueron analizadas usando microscopía electrónica de barrido en el equipo Tescan-Vega.

2.4. DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE 10 T/MES DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA CAÑA GUADUA MEDIANTE ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO Y EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD ECONOMICA

El diseño de la planta para la producción de carbón activado consistió en el diseño conceptual y básico de la planta y su respectivo análisis económico. El diseño conceptual consistió en la definición de las características de la materia prima, en este caso la caña guadua, y del producto obtenido, que es el carbón activado, basado en los resultados obtenidos a escala laboratorio y piloto. También se determinó los requerimientos de servicios industriales, macro y micro localización (Páez, 2013, p. 13).

El diseño básico de la planta consistió en la realización de los balances de masa y energía, los diagramas del proceso BFD y PFD. También se realizó el dimensionamiento y selección de los equipos de reducción de tamaño para la caña guadua, silos de almacenamiento de la caña guadua y el carbón impregnado, tanques de mezcla e impregnación del hidróxido de potasio (KOH), los tanques de recuperación del KOH para su recirculación y los filtros para la recuperación del carbón impregnado y activado. También se realizó el diseño del horno de carbonización de la caña guadua y de activación del carbón de la caña guadua.

Con base en los resultados de las pruebas a escala laboratorio y piloto además de la caracterización física y química de la materia prima, se diseñó un horno rotatorio con la capacidad de trabajar como horno de carbonización y horno de activación. Para esto se usó las ecuaciones propuestas por Sullivan para el diseño de hornos rotatorios que se menciona a continuación. (Sullivan, Charles y Oliver, 1927, p. 30). Del manual de Perry se obtuvieron datos característicos que ayudan para el diseño del horno rotatorio como la relaciones longitud diámetro (L/D) y las velocidades de rotación del horno. (Perry y Green, 1999, p. 2130).

La Ecuación 2.8. es empleada para la determinación del diámetro del horno:

$$D = \sqrt{\frac{W_s \times 4 \times t}{L \times g_r \times \pi \times \rho}} \quad [2.8]$$

Donde:

W_s : Flujo de alimentación [kg/min]

t : tiempo [min]

L : Longitud [m]

g_r : Grado de llenado [%]

ρ : densidad del sólido [g/cm³]

También se determinó el tiempo de residencia que se describe en la Ecuación 2.9. Con esta ecuación se recalcula el nuevo tiempo de residencia en base a las dimensiones del horno.

$$t^3 = \frac{1,77 \times L^3 \times g_r \times \pi \times \rho \times \vartheta}{p^2 \times D \times W_s \times 4 \times N^2} \quad [2.9]$$

Donde:

L : Longitud [m]

g_r : Grado de llenado [%]

p : Inclinación del horno [%]

D : Diámetro [m]

W_s : Flujo de alimentación [kg/min]

N : Velocidad de rotación [RPM]

Con estas dos ecuaciones se determinó las dimensiones del horno que funcionará como horno de carbonización y como horno de activación. Con las dimensiones determinadas se realizó un diagrama Lay-out donde se esquematizó el

ordenamiento de todos los equipos seleccionados y la distribución que tendrán en la planta.

Para el análisis de prefactibilidad económica se usó indicadores económicos como la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN) para evaluar si resulta factible, desde el punto de vista económico, la instalación de una planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química con hidróxido de potasio. Las formulas para el cálculo de los dos indicadores señalados se presentan en las Ecuaciones 2.10 y 2.11.

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_o \quad [2.10]$$

$$TIR = \sum_{i=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_o \quad [2.11]$$

Donde:

VAN : Valor actual neto [USD]

I_o : Valor de la inversión inicial [USD]

BN_t : Beneficio neto en un periodo de tiempo t [USD]

i : Tasa de interés [%]

n : Cantidad de periodos

También se realizó un flujo de caja con una proyección de 10 años del proyecto y se realizó una gráfica de precio del producto versus cantidad de producto vendido para determinar el punto de equilibrio del proyecto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la caracterización física y química de la caña guadua, del estudio de carbonización de la caña guadua, del estudio de activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua y el diseño de la planta para la producción de 10 t/mes de carbón activado

3.1. CARACTERIZACION FÍSICA Y QUÍMICA DE LA CAÑA GUADUA PROVENIENTE DE LA ZONA DE NANEGAL, PROVINCIA DE PICHINCHA

Se realizó la caracterización física y química de la caña guadua en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional. Para realizar todos los procedimientos señalados de caracterización y estudios primero se redujo de tamaño la materia prima. En la Figura 3.1. se observa el aspecto de la caña guadua obtenida luego del proceso de reducción de tamaño.



Figura 3.1. Aspecto de la caña guadua luego del proceso de reducción de tamaño

Los trozos obtenidos tenían un tamaño de entre 2 a 3 cm que se consideraron ya aptos para realizar los estudios de caracterización, carbonización y activación que se describen a continuación. Se obtuvieron alrededor de 5 cañas guaduas, con un peso total de alrededor de 25 kg.

3.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CAÑA GUADUA

Para la caracterización física de la caña guadua se siguió los procedimientos señalados en la sección 2.1.1 donde se determinaron contenido de humedad, material volátil, carbón fijo y cenizas, densidad aparente y ángulo de reposo obteniéndose los siguientes resultados. En el Anexo I se observa el detalle la determinación de los resultados de todos los ensayos realizados en esta sección.

3.1.1.1. Determinación de humedad

A continuación se presentan los resultados de los análisis de humedad realizados a 4 muestras de aserrín de caña guadua. Se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.1.1.1. El aserrín de la caña guadua se obtuvo del proceso de reducción de tamaño de las cañas.

Tabla 3.1 Determinación de la humedad de 4 muestras de caña guadua

Muestra	% Humedad
Muestra 1	9,5
Muestra 2	9,1
Muestra 3	10,1
Muestra 4	8,6
Promedio	9,3
Desviación	±0,6

Como se observa en la Tabla 3.1 el valor de la humedad oscila entre el 8,0% al 10,0%, con un valor promedio de 9,3% con una desviación estándar de $\pm 0,6\%$. Los valores de humedad obtenidos de las 4 muestras de caña guadua presentan valores muy cercanos entre sí y la diferencia entre el mayor valor y el menor valor no es superior al 2,0%. La desviación estándar da un valor del 0,6% para los datos de humedad de la caña guadua, lo que quiere decir que el valor promedio de la humedad es aceptable y se puede inferir a toda la materia prima en general. Según Oyedun (2013), la humedad del bambú es de 10,1% (p. 596), valor que está muy cercano al obtenido en la experimentación y por lo tanto aceptable.

3.1.1.2. Determinación del contenido de material volátil, carbón fijo y cenizas

La determinación de material volátil, carbón fijo y cenizas se realizaron mediante los procedimientos señalados en las secciones 2.1.1.2 y 2.1.1.3. En la Tabla 3.2 se puede observar los resultados de los ensayos realizados para la determinación de material volátil, carbón fijo y cenizas.

Se puede observar que el material volátil es el mayor componente de la caña guadua (81,6%). Esto quiere decir que la caña guadua tiene en su composición química un alto porcentaje de celulosa y hemicelulosa, que son los componentes más volátiles de la estructura de la biomasa.

Tabla 3.2 Resultados de determinación de material volátil, carbón fijo y cenizas para la caña guadua

	%Volátiles	%Carbón	%Cenizas
Muestra 1	84,3	13,3	2,2
Muestra 2	79,1	15,6	5,2
Muestra 3	80,4	17,4	2,1
Muestra 4	82,5	15,4	1,9
Promedio	81,6	15,4	2,8
Desviación	$\pm 2,3$	$\pm 1,7$	$\pm 1,6$

El porcentaje de carbón fijo (15,4%) da una primera aproximación del rendimiento que presentará la materia prima en el proceso de carbonización. Este valor también es un indicador de la cantidad de lignina presente en la composición de la caña, ya que este componente es el más difícil de degradar durante la pirólisis de la caña guadua.

La cantidad de carbón fijo en la materia prima es altamente dependiente de la composición de la materia prima, de ahí que en bibliografía se mencionen valores distintos a los obtenidos en esta experimentación. Por ejemplo, González et al. (2013) reporta un contenido de carbón fijo del 23,1% para la *G. Angustifolia* (p. 34). Esto demuestra que la composición de la caña guadua es altamente dependiente de factores no controlables como clima o la composición del suelo donde creció y desarrollo.

En el contenido de cenizas se observa variación entre los resultados obtenidos. El valor determinado experimentalmente (2,9%) de igual forma difiere en gran medida de otros valores bibliográficos, como por ejemplo Oyedun et al. (2013) reporta 1,9% de cenizas (p. 596), González et al. (2013) reporta un valor de 2,9% y Choy et al. (2005) reporta un valor de 3,9% (p. 148). Sin embargo este valor no excede el 5,0% en ninguno de los casos mencionados.

3.1.1.3. Determinación de la densidad aparente, densidad real y ángulo de reposo de la caña guadua

Para la determinación de la densidad aparente y real de la caña guadua se siguieron los procedimientos que se describen en las secciones 2.2.1.4. y 2.2.1.5. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.3.

Los valores determinados experimentalmente se corroboran con datos bibliográficos. Por ejemplo según la norma INEN 042 (1976) señala que la caña guadua en Ecuador tiene una densidad real de alrededor de 0,86 g/cm³ (p. 3) muy similar al valor obtenido experimentalmente.

Tabla 3.3 Resultados de densidad aparente, densidad real y ángulo de reposo de la caña guadua

Parámetro	Valor
Densidad Real	0,86 g/cm ³
Densidad aparente	0,75 g/cm ³
Ángulo de reposo	33,90°

3.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA CAÑA GUADUA

Para la caracterización química de la caña guadua se siguieron los procedimientos señalados en la sección 2.1.2. En el Anexo II se observa el detalle la determinación de los resultados de todos los ensayos realizados en esta sección.

3.1.2.1. Análisis termogravimétrico

Se realizó un análisis termogravimétrico para evaluar el comportamiento de la caña guadua bajo una degradación térmica en atmósfera inerte. Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la sección 2.1.2.1, de donde se obtuvieron dos gráficas. La curva TGA, es la curva de variación de la masa a lo largo de la temperatura (Δm vs T°). La curva DTGA, es la derivada de la primera curva en función de la temperatura ($\Delta m/\Delta t$ vs T°).

La curva TGA se observa en la Figura 3.2 y la curva DTGA se observa en la Figura 3.3. que corresponden a un análisis termogravimétrico para una muestra pulverizada de caña guadua con una tasa de calentamiento de 10 K/min y en atmósfera inerte de nitrógeno con un flujo de 50 mL/min. En estas dos figuras se observan claramente las 4 zonas definidas que se dan durante la pirólisis de la biomasa. La etapa de pre pirolisis se identifica claramente desde la temperatura ambiente hasta los 140,68 °C. En esta etapa se termina de eliminar la humedad

remanente en la estructura de la caña, además de agua ligada a la estructura de la celulosa. Aquí se aprecia un pico muy definido en la curva DTGA que representa una pérdida de peso de 5,74%. La segunda etapa de la pirólisis está comprendida entre los 140,68 °C hasta los 365,43 °C, donde se registra la mayor pérdida de peso que es del 49,74% y esto se puede observar claramente en las dos curvas.

En la curva TGA se observa una pendiente muy pronunciada en este intervalo de temperatura y en la curva DTGA se observa el pico más grande de todo el ensayo. La pérdida de peso se debe a la volatilización de la hemicelulosa y celulosa, que son los componentes más volátiles de la estructura de la caña. También se descompone, pero en menor medida y forma progresiva, la lignina en esta etapa.

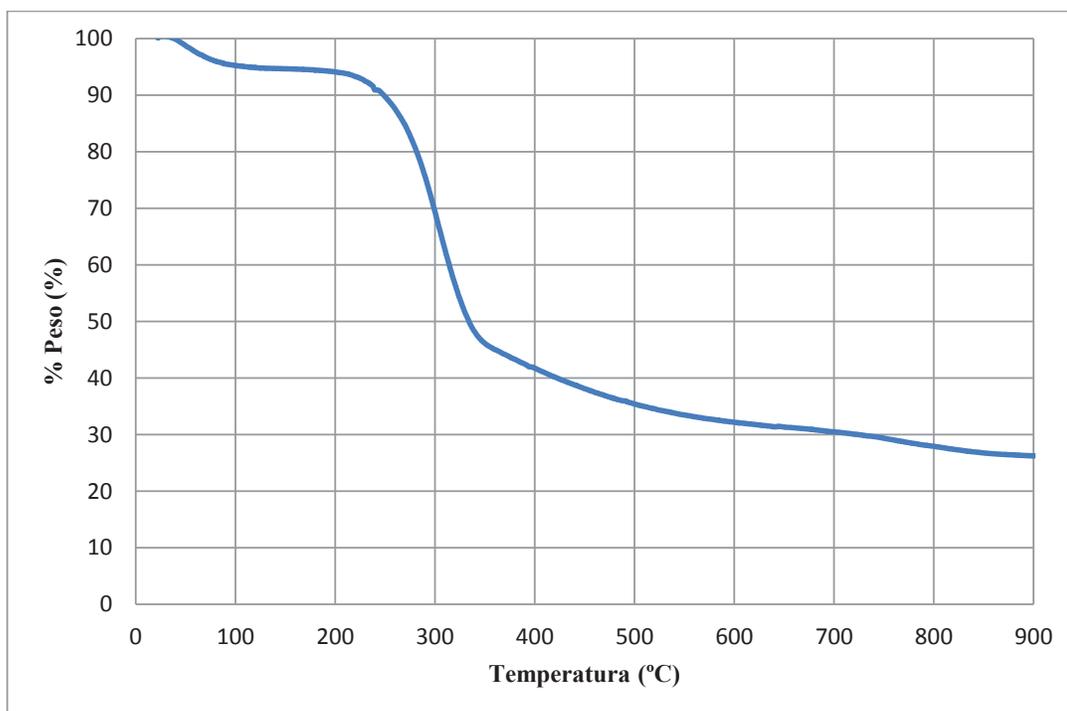


Figura 3.2. Curva TGA de la pirólisis de una muestra de caña guadua con velocidad de calentamiento de 10°K/min (*Guadua Angustifolia* K.)

La tercera etapa está comprendida entre los 365,43 °C hasta los 735,98 °C. Se registra una pérdida de peso del 14,82%, que se debe en mayor parte a la

descomposición progresiva de la lignina y los últimos elementos volátiles de la celulosa.

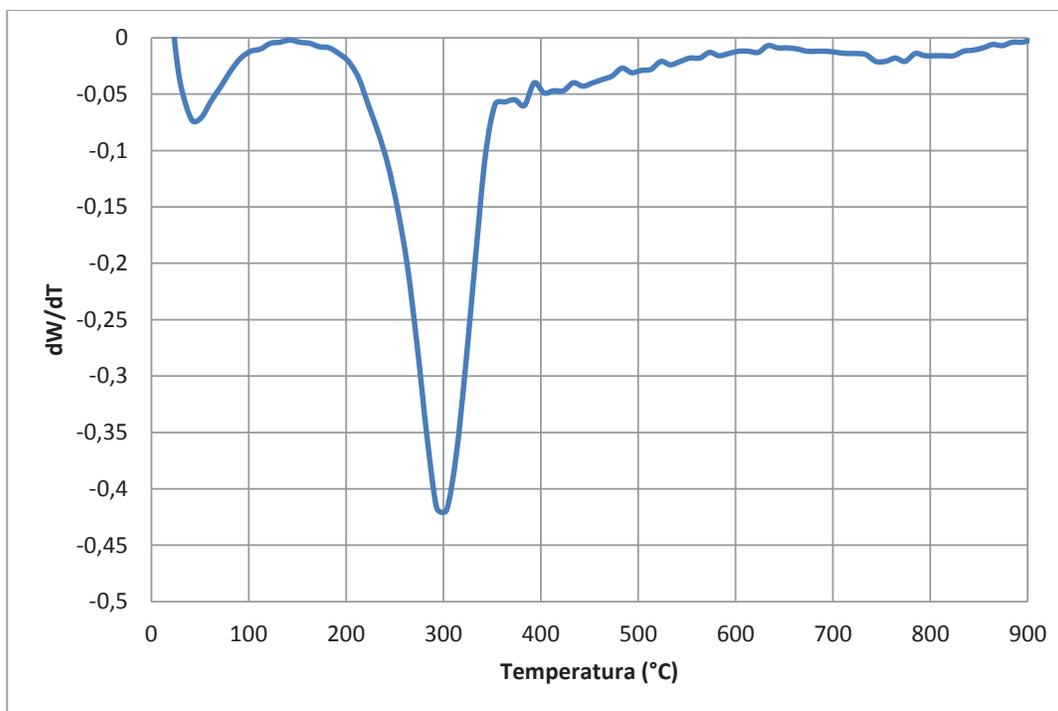


Figura 3.3. Curva DTGA de la pirólisis de una muestra de caña guadua con velocidad de calentamiento de 10°K/min (*Guadua Angustifolia* K.)

La cuarta etapa es solamente eliminación de los últimos elementos gaseosos asociados a la lignina. En esta etapa se registra la menor pérdida de peso que es del 3,53% y se da hasta alcanzar la máxima temperatura del ensayo (950 °C). El rendimiento que presenta la caña guadua en material carbonáceo es de alrededor del 26,17%. A partir de esta temperatura solo queda el residuo carbonoso formado producto de la pirólisis en atmósfera inerte.

3.1.2.2. Determinación de la composición química de la caña guadua

Para la determinación de la composición química de la caña guadua se usó el método de Coats-Redfern para la determinación de los parámetros cinéticos. En primer lugar se intentó linealizar los datos obtenidos en las curvas TGA y DTGA

con el método propuesto por Kim, Park y Chum (1995) donde la determinación de los parámetros cinéticos se realizaba graficando $\ln\left(-\frac{\beta}{w_1} \frac{dw_1}{dT}\right)$ vs $\frac{1}{T}$. (p. 508). Sin embargo, al graficar los datos obtenidos del análisis TGA mediante este método no se logró la linealización de las curvas de cada uno de los polímeros y los factores de correlación R^2 obtenidos tenían un valor inferior a 0,5. Debido a esto se prefirió el método de Coats y Redfern señalado por Chen, Zhou y Zhang (2014) donde determina los parámetros cinéticos de los polímeros lignocelulósicos durante la pirólisis del bambú.

Según el procedimiento descrito por Kim et al. (1995), para la determinación de los parámetros cinéticos primero se debe establecer los intervalos de temperatura donde se degrada cada uno de los componentes de la caña guadua. (p. 509). Según Oyedum et al. (2013), los intervalos de descomposición de los 3 componentes se presentan a en la Tabla 3.4.:

Tabla 3.4 Intervalos de descomposición de los diferentes compuestos de la caña guadua identificados en la curva TGA

Región	Intervalo de Temperatura
Alta temperatura	543 °C - 744 °C
Media temperatura	280 °C – 543 °C
Baja Temperatura	200 °C - 280 °C

Así de esta manera se establece que los primeros parámetros cinéticos a determinarse serán del polímero más difícil de degradar, que en este caso es la lignina. A partir de la determinación de los parámetros cinéticos de la lignina se siguió el procedimiento descrito en la sección 1.2.4. para la determinación de los parámetros cinéticos de los dos polímeros restantes de la composición química de la caña guadua. En la Figura 3.4 se observa la linealización $\ln\left[\frac{AR}{\beta E_a}\left(1 - \frac{2RT}{E_a}\right)\right]$ vs $\frac{1}{T}$ para las curvas TGA resultantes de las zonas de alta temperatura, media temperatura y baja temperatura.

Como se observa, la linealización de cada una de las zonas se considera aceptable ya que los coeficientes de correlación tienen valores muy cercanos a 1.

La linealización de la curva de bajas temperaturas, que es donde se degrada la hemicelulosa, es la que presenta el valor más bajo de coeficiente de correlación R^2 con un valor de 0,8744. Sin embargo este valor se puede considerar aceptable ya que se trata de datos obtenidos experimentalmente donde el error o sensibilidad del equipo interfieren en la exactitud de los resultados.

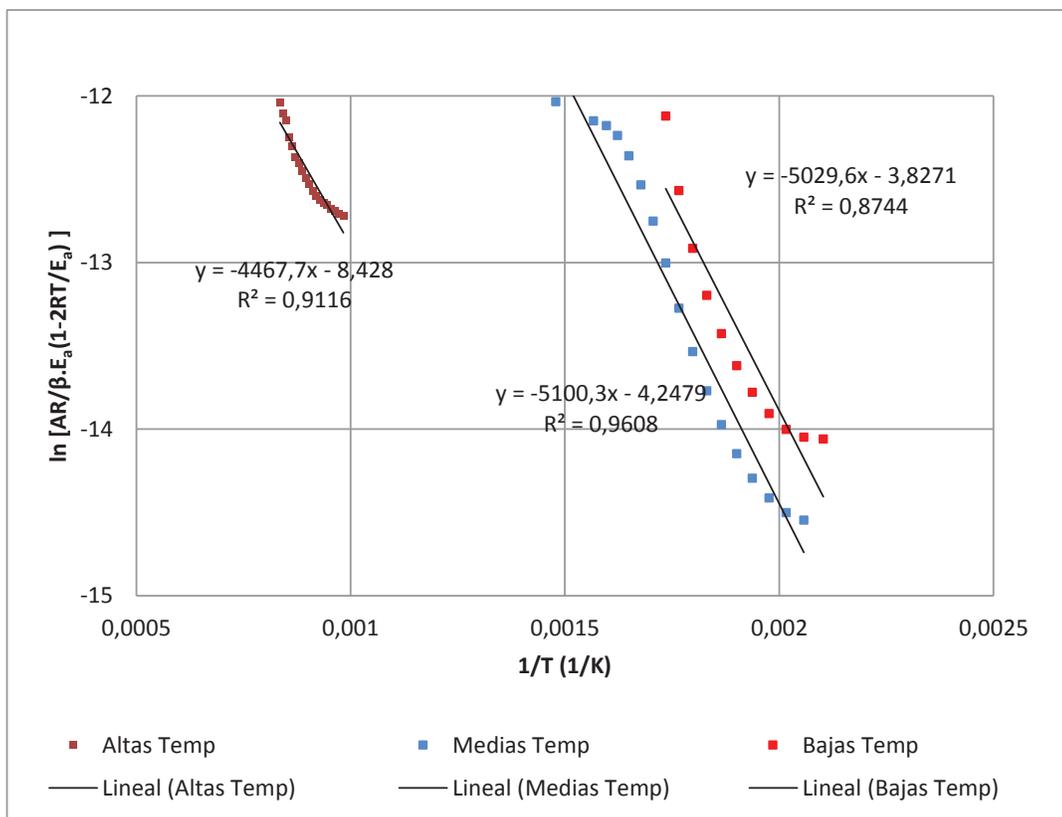


Figura 3.4. Linealización $\ln \left[\frac{AR}{\beta E_a} \left(1 - \frac{2RT}{E_a} \right) \right]$ vs $\frac{1}{T}$ para la determinación de los parámetros cinéticos de la lignina, celulosa y hemicelulosa

Para las otras dos linealizaciones realizadas en las regiones de media y alta temperatura, presentan valores de R^2 cercanos a 0,9 considerándose estos valores también aceptables. A partir de las ecuaciones de las rectas determinadas se obtuvieron los parámetros cinéticos de cada uno de los componentes de la caña guadua.

La energía de activación (E_a) y factor de frecuencia (A) para los tres componentes de la caña guadua además son valores necesarios para aplicarlos en el método

diferencial de Kofstad (1957) y Flynn y Wall (1966) para poder determinar la composición química inicial de la caña guadua. Estos valores se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Parámetros cinéticos de la lignina, celulosa y hemicelulosa determinados mediante el método de Coats-Redfen

Componente	Energía de activación [kJ/mol]	Factor pre-exponencial [1/min]	Coefficiente correlación
Lignina	37,1	$1,04^{-4}$	0,91
Celulosa	215,7	$5,45 \times 10^{18}$	0,96
Hemicelulosa	102,4	$1,66 \times 10^4$	0,87

Los valores obtenidos son similares a otros reportados en estudios como el de Mui et al. donde los valores de energía de activación (E_a) varían entre 81 y 137 kJ/mol para la hemicelulosa, entre 278 y 326 kJ/mol para la celulosa y entre 16 y 27 kJ/mol para la lignina. De igual forma, los valores del factor pre-exponencial (A) obtenidos también entran en los rangos que menciona dicho estudio, como por ejemplo la celulosa esta en el rango entre $1,37 \times 10^{22}$ hasta $3,63 \times 10^{19}$ (p. 825).

Con los datos que se muestran en la Tabla 3.5 es posible determinar la composición inicial de cada uno de los polímeros constituyentes de la caña guadua y así poder caracterizar el material químicamente. Para esto se usaron las Ecuaciones 1.5. y 1.6. para calcular los pesos iniciales y el porcentaje que representa en el peso total de la muestra de caña guadua. Los resultados en forma gráfica de la composición química de la caña guadua se muestran en la Figura 3.5. donde se observa las curvas DTG obtenidas para cada polímero constituyente y para la caña guadua en general.

En esta curva se observa como cada uno de los picos característicos de cada polímero se solapa con los picos que se obtuvieron en la gráfica DTG de la caña guadua. Se observa por ejemplo que el pico que corresponde a la lignina y que se ubica entre los 400 °C y 500 °C, zona de altas temperaturas, se solapa perfectamente con la DTG de la caña guadua obtenida. Un comportamiento similar se observa en la zona de medias temperaturas, entre 300 °C y 400 °C,

donde se observa el pico más grande. En esta zona se degrada en mayor parte la celulosa, pero se observa que la curva no se ajusta completamente al pico obtenido por lo que se presume que en menor medida también hay degradación de lignina y hemicelulosa. El primer pico se solapa casi completamente con el pico que presenta la hemicelulosa, que es el componente más volátil en la composición de la caña guadua. De igual forma que con el pico de la celulosa, el de la hemicelulosa no se ajusta completamente, pero se considera que es el componente que más se volatiliza entre los 200 °C y 300 °C.

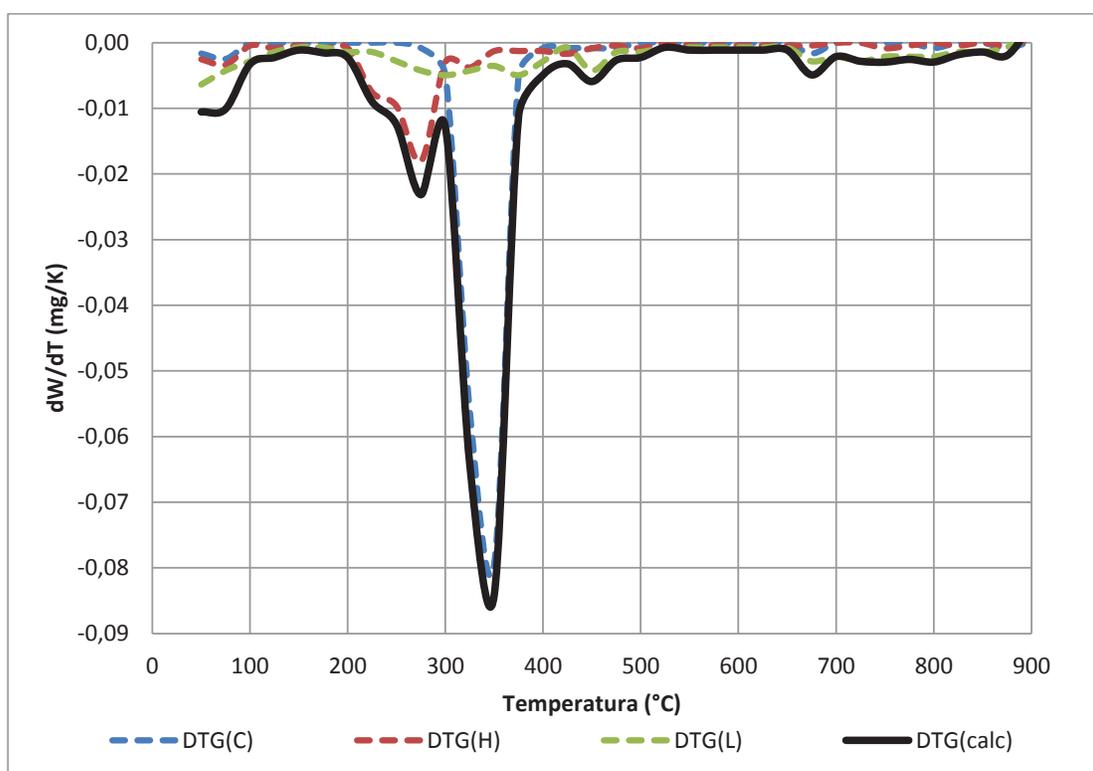


Figura 3.5. Curvas DTG obtenidas a partir de los parámetros cinéticos determinados para: celulosa (C), hemicelulosa (H), lignina (L) y caña guadua (calc)

A partir de estos datos se obtuvo la composición de la caña guadua, en porcentaje de cada uno de los polímeros constituyentes que se consideraron en este estudio. En la Tabla 3.6 se presenta la composición en porcentaje de la caña guadua determinada. Como se puede observar los valores determinados para la materia prima utilizada en este estudio tienen cierta semejanza con valores que reportan otros autores. Los tres autores coinciden en que el mayor componente

de la caña guadua es la celulosa, con valores en los 3 casos, mayores del 40%. También se observa que la hemicelulosa, en los 3 casos, representa el menor valor de los 3 componentes lignocelulósicos. En el caso de la lignina se aprecia una disparidad de valores que van desde el 26% hasta el 31%.

Tabla 3.6 Composición lignocelulósica de la caña guadua

	Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)
Guadua Angustifolia (Pichincha)	31,2	41,3	21,0
Guadua Angustifolia (Oyedun et al.)	26,2	43,3	24,6
Guadua Angustifolia (Velazquez-Trujillo et al.)	28,2	47,1	18,2

Esta variación en los valores que se presentan también se puede deber al porcentaje de cenizas que posee cada materia prima mencionada y que además, es variable dependiendo de la zona donde se crece y se desarrolla el bambú. En este caso, entre los tres tipos de bambú que se presentan se aprecia que la variación en el contenido de cenizas varía en valores que van desde el 3% hasta el 7%. Esto también resta porcentaje de peso a los polímeros lignocelulósicos presentes en cada una de las materias primas señaladas.

3.1.2.3. Determinación de la presencia de metales en la caña guadua

La determinación de la presencia de metales en las cenizas de la caña guadua se realizó según el procedimiento señalado en la sección 2.1.2.2. En la Tabla 3.7. se presentan los resultados del análisis de absorción atómica. Los metales analizados fueron: aluminio, silicio, calcio, magnesio, sodio, potasio y hierro.

Como se puede ver en la Tabla 3.7. en la composición mineral de la caña guadua el sodio y el silicio son los componentes con más presencia en las cenizas obtenidas de la caña guadua, se comprueba lo que señala Li (2004), donde

señala que el silicio es el componente mayoritario en las cenizas de la caña guadua (p. 22).

Tabla 3.7 Resultados de análisis de absorción atómica de una muestras de cenizas de la caña guadua

Elemento	Aluminio (mg/g)	Silicio (mg/g)	Calcio (mg/g)	Magnesio (mg/g)	Sodio (mg /g)	Potasio (mg/g)	Hierro (mg/g)
M1	0,932	1,702	0,968	0,534	1,040	1,560	0,03959

Por otro lado, el hierro es el metal que tiene menos presencia con 0,039 mg de hierro por cada gramo de caña guadua. La composición de estos minerales en la materia prima es altamente dependiente de las condiciones del suelo y del clima de la zona donde ha crecido la planta. La presencia de minerales como aluminio y calcio son producto de la interacción de la materia prima con el suelo y estos minerales son arrastrados mediante el viento o el agua mientras que otros minerales como el hierro y el silicio son productos derivados de la descomposición de la materia prima o incluso de la formación del carbón de la caña.

3.1.2.4. Caracterización de la estructura de la caña guadua

Para la caracterización de la estructura de la caña guadua se usaron imágenes de microscopía electrónica de barrido. En las Figuras 3.6. a y b se pueden observar fotos a diferentes grados de aumento de la estructura de la caña guadua.

En la Figura 3.6. (a) se observa la dirección longitudinal de las fibras de la caña guadua. La materia prima tiene una estructura ordenada longitudinalmente, con fibras muy largas y resistentes. En la Figura 3.6. (b) se observa la misma estructura ordenada longitudinalmente a un mayor aumento donde se observa más a detalle la forma longitudinal de las fibras de la caña, pero además también un serie de celdas de las que está constituida la pared celular de la caña guadua. Estas estructuras largas son típicas de la celulosa presente en la caña guadua ya

que este polímero es de cadena larga y es el que en mayor proporción se encuentra. Esta estructura ordenada de la caña guadua es lo que complica el proceso de reducción de tamaño debido a que las fibras longitudinales le dan a la estructura una gran resistencia haciéndola difícil de doblar o de romper.

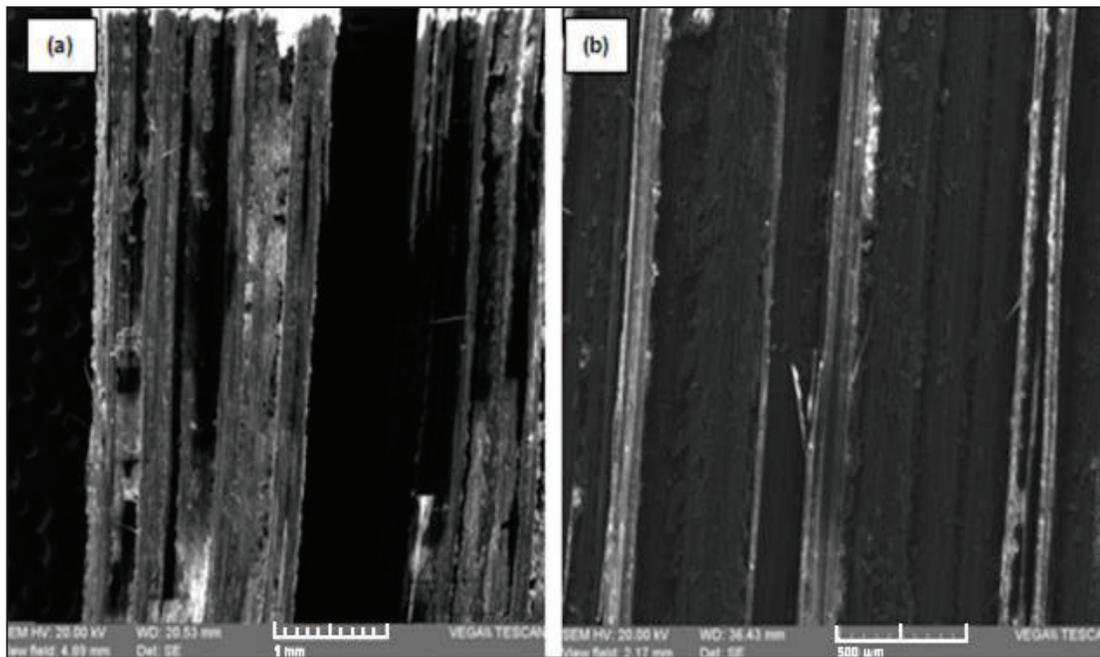


Figura 3.6. Fotografías MEB de la estructura de la caña guadua a (a) mínimo aumento y (b) 100 grados de aumento

3.2. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA CARBONIZACIÓN DE LA CAÑA GUADUA

A continuación se presentan los resultados de la evaluación de los parámetros para la carbonización de la caña guadua. Se siguieron los procedimientos descritos en la sección 2.2. de esta investigación donde se contemplan pruebas a escala laboratorio y pruebas a escala piloto para evaluar los parámetros de carbonización de la caña guadua.

En el Anexo III se observa el detalle la determinación de los resultados de todos los ensayos realizados en esta sección.

3.2.1. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO PARA LA CARBONIZACION DE LA CAÑA GUADUA

Para la evaluación de los parámetros de la carbonización de la caña guadua a escala laboratorio se analizó la influencia de la temperatura y del tiempo en la carbonización de la caña guadua. Tomando los mejores resultados obtenidos mediante este estudio se realizó una prueba a escala piloto en el horno piloto Nichols Herreshoff.

3.2.1.1. Evaluación de la influencia de la temperatura en la carbonización de la caña guadua

Los ensayos se realizaron a temperaturas de 400 °C, 500 °C y 600 °C porque en este rango de temperaturas la variación de la masa de la caña guadua en atmósfera inerte se estabiliza y solo queda como residuo el carbón formado. Esto según el análisis termogravimétrico que se observa en la Figura 3.2. y Figura 3.3.

A partir de los 400 °C empieza la estabilización de la curva de degradación debido a que a partir de esta temperatura ya no quedan elementos volátiles en la estructura de la caña y en su lugar solo queda el carbón presente en la materia prima. Se realizaron ensayos a tiempos de 1,0 y 2,0 horas de carbonización en las temperaturas seleccionadas para evaluar la influencia del tiempo.

En la Figura 3.7. se observa la variación del porcentaje de carbón fijo y volátiles en función de la temperatura de carbonización para 1 hora de carbonización a temperaturas de 400 °C, 500 °C y 600 °C. A 600 °C y 1 h de carbonización se obtiene un material con 80,7% de carbón fijo mientras que a 650 °C este porcentaje alcanza el 83,7%. En adelante el porcentaje de carbón fijo ya no tiene aumentos apreciables como los que se observaron a temperaturas inferiores.

También se observa que en el rango entre los 500 °C y los 600 °C hay el mayor incremento en el porcentaje de carbón fijo que es alrededor del 17,0%, a

diferencia del que se observa en el rango entre 400 °C y 500 °C donde el aumento es solo del 6,0%. A medida que el porcentaje de carbón fijo aumenta se observa que el porcentaje de material volátil disminuye con el incremento de la temperatura. Este valor alcanza un valor de 11,2% a los 600 °C. De igual forma se observa que la mayor pérdida de material volátil se da en el rango de temperatura entre 500 °C y 600 °C.

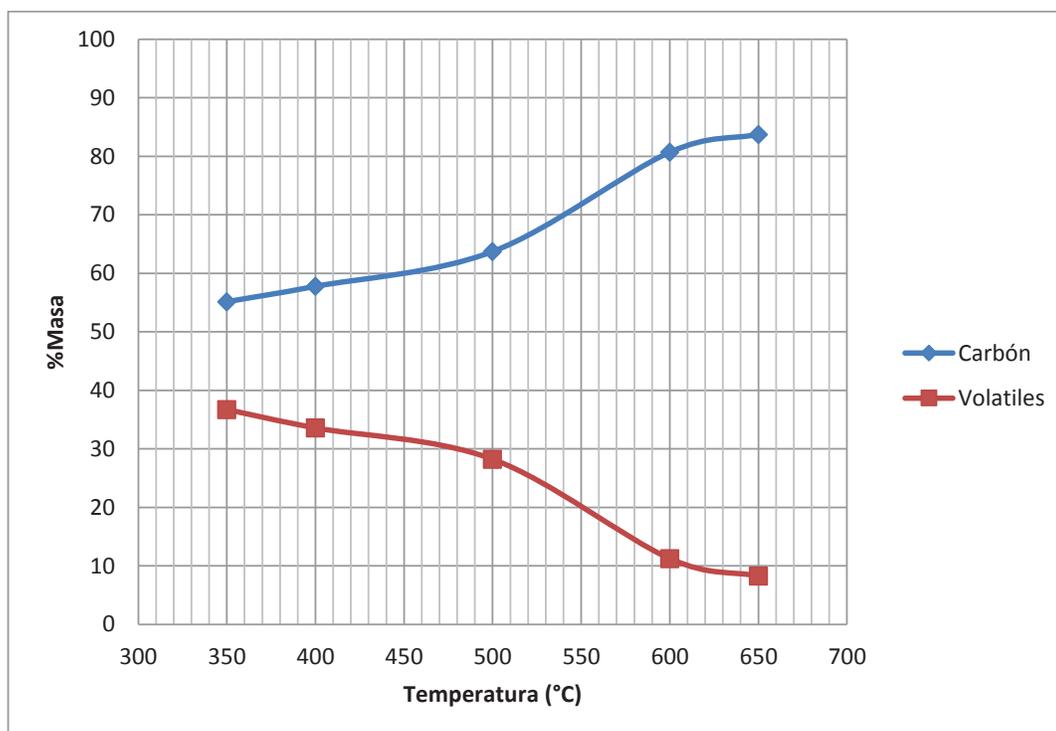


Figura 3.7. Carbonización de la caña guadua en función de la temperatura a un tiempo de 1 h

En la Figura 3.8. se observa la variación del porcentaje de carbón fijo y volátiles en función de la temperatura de carbonización para 2 horas de carbonización a temperaturas de 400 °C, 500 °C y 600 °C. La gráfica obtenida presenta la misma tendencia que se observó en la Figura 3.7. donde el porcentaje de carbón fijo obtenido aumenta a medida que aumenta la temperatura y a partir de los 600 °C este porcentaje tiende a estabilizarse. Se observa que para un tiempo de carbonización de 2 h y 600 °C se alcanza un porcentaje de carbón fijo de 83,3%, que es un valor muy similar al alcanzado para 1 h de carbonización (80,7 %) a la misma temperatura.

Al observar las Figuras 3.7 y 3.8 se observa que tanto para 1 h como para 2 h el porcentaje de carbón fijo es mayor al 80,0%, con una diferencia de tan solo del 2,6%. Así se puede concluir que a partir de un tiempo de 1 h de carbonización se ha eliminado casi en su totalidad los componentes volátiles de la caña guadua y que después de esto solo queda como residuo un material con contenido de carbón de alrededor del 80,0%, todo esto a partir de los 600 °C.

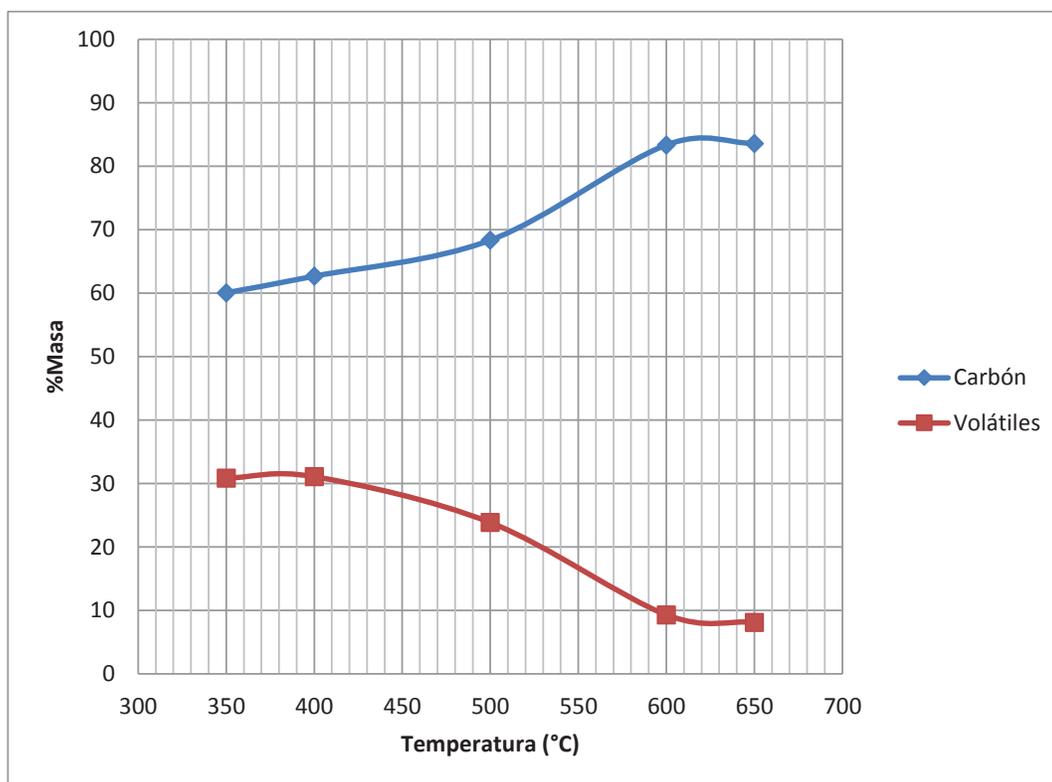


Figura 3.8. Carbonización de la caña guadua en función de la temperatura a un tiempo de 2 h

Por lo observado en este estudio, a 600 °C se asegura la eliminación de casi la totalidad de los elementos volátiles de la estructura de la caña guadua y se obtiene un material carbonoso de alta pureza.

3.2.1.2. Evaluación de la influencia del tiempo en la carbonización de la caña guadua

Para analizar la influencia del tiempo en la carbonización de la caña guadua se analizó la variación del porcentaje de carbón fijo en función del tiempo

realizando ensayos a temperaturas fijas de 400 °C, 500 °C y 600 °C, durante tiempos entre 0,5 horas y 2,5 horas. Así se puede evaluar como varía el porcentaje a lo largo del tiempo a una temperatura ya establecida. En la Figura 3.9. se observa la cinética de carbonización de la caña guadua a 400 °C a lo largo del tiempo.

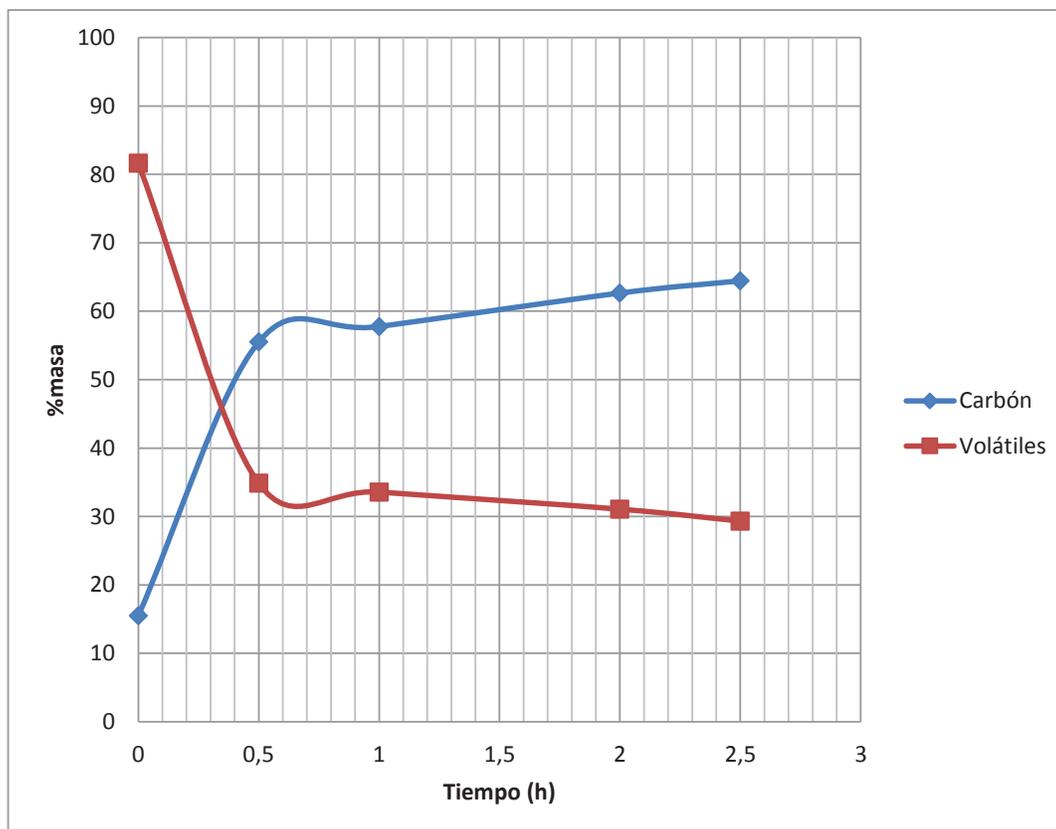


Figura 3.9. Carbonización de la caña guadua en función del tiempo a 400 °C

A 400 °C se alcanza un porcentaje máximo de carbón fijo en el producto de 64,5 %. A lo largo del tiempo el porcentaje de carbón fijo sigue una tendencia de aumento progresivo a lo largo del tiempo. Esto quiere decir que los elementos volátiles presentes en la caña guadua no se han terminado de separar de su estructura. También se observa que la mayor variación en el porcentaje de masa de la caña guadua se durante la primera media hora de carbonización, sin embargo a 400 °C no se alcanza una estabilización del valor del carbón fijo hasta las 2 horas.

En la Figura 3.10. se observa la cinética de carbonización a 500 °C en función del tiempo. Se observa que el porcentaje máximo de carbón fijo para la cinética de carbonización a 500 °C es del 70,85%. Es previsible que el porcentaje de carbón fijo aumente, ya que a mayor temperatura se favorece la eliminación de estos compuestos, pero sin embargo no alcanza un valor estable durante las 2,5 horas del ensayo.

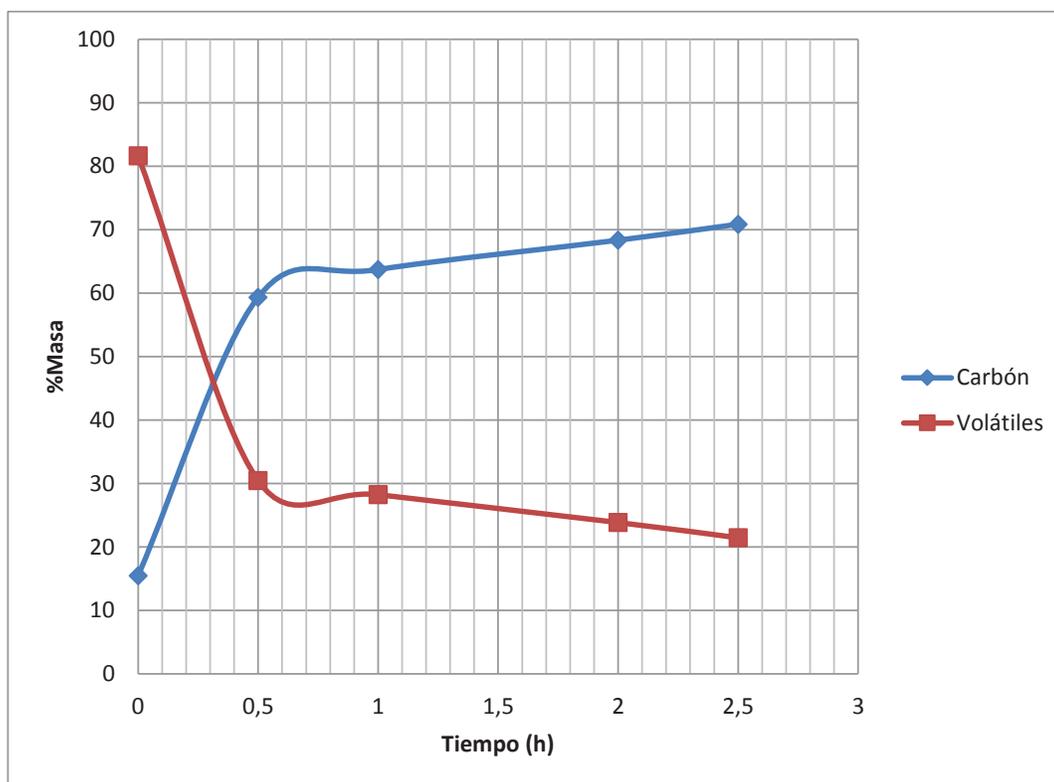


Figura 3.10. Carbonización de la caña guadua en función del tiempo a 500 °C

En la Figura 3.11. se observa la cinética de carbonización de la caña guadua a 600 °C. Se puede observar que a 600 °C el máximo porcentaje de carbón fijo alcanzado es de 83,9%. Así a partir de la primera hora de ensayo el porcentaje de carbón fijo ya supera el 80,0%, que es un valor superior a los alcanzados en los ensayos a 400°C y 500°C.

En cuanto al porcentaje de material volátil, este valor igualmente se estabiliza a partir de la primera hora y alcanza un valor de 11,2%, que de la misma forma es el más bajo obtenido en comparación con los resultados a 400 °C y 500 °C,

indicando que a los 600 °C se obtiene un material con alta cantidad de carbón fijo y bajo porcentaje de material volátil. Al analizar la influencia de la temperatura en las cinéticas de carbonización se observa que a temperaturas más altas se elimina más material volátil, sin embargo temperaturas de 400 °C y 500 °C a lo largo de las 2,5 horas de carbonización no logran eliminar por completo los componentes volátiles de la materia prima y por tanto el valor del carbón fijo no llega a estabilizarse. Solo es a partir de los 600 °C donde se observa que el porcentaje de carbón fijo alcanza valores estables a lo largo del tiempo.

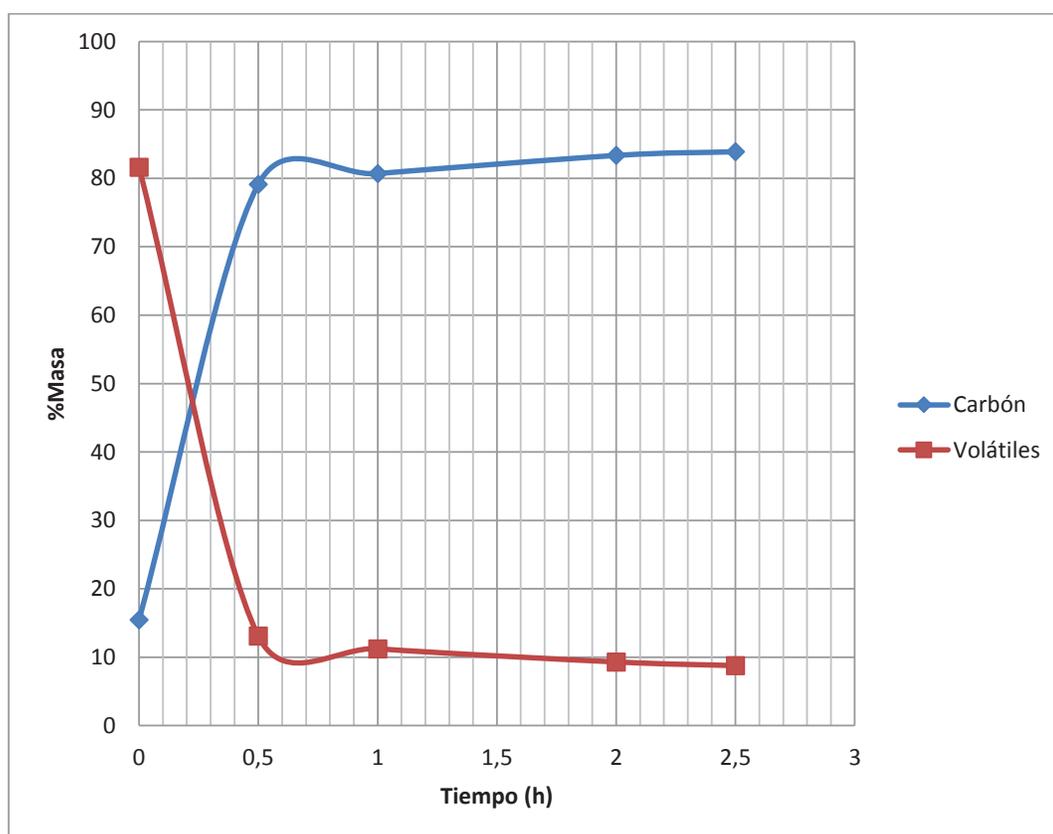


Figura 3.11. Carbonización de la caña guadua en función del tiempo a 600 °C

El objetivo de este análisis es determinar a qué condición se obtiene la mayor cantidad de carbón fijo, con un porcentaje bajo de material volátil optimizando el tiempo de carbonización. Los resultados obtenidos a 600 °C son los que cumplen con este objetivo, ya que produce un material con alto valor de carbón fijo y estable, con un contenido de material volátil bajo en un menor tiempo.

3.2.1.3. Análisis de rendimiento de carbonización de la caña guadua

Para analizar el rendimiento de carbonización de la caña guadua se analizó la variación de peso que experimenta la materia prima a las temperaturas y tiempos determinados en los ensayos anteriores. En la Tabla 3.8. se muestran los resultados de los rendimientos de carbón para las temperaturas de 400 °C, 500 °C y 600 °C a las que se realizaron los ensayos.

Se observa que a 400 °C se tiene el mayor rendimiento de carbón carbonizándole a 1 hora (34,8%), y la diferencia entre carbonizar a 1 y 2 horas no es muy apreciable. Este valor relativamente alto se debe a que a esta temperatura todavía queda en el carbón un gran porcentaje de material volátil de alrededor del 30% en peso.

Por otro lado a 600 °C es donde se obtiene el menor rendimiento tanto para 1 hora (25,5%) como para 2 horas (25,3%). A esta temperatura el porcentaje de material volátil es de alrededor del 10%. Para la producción de carbón activado se prefiere tener un material con la menor cantidad de material volátil, y a 600 °C se obtienen rendimientos similares tanto para 1 o 2 horas y con una cantidad de material volátil muy baja.

Tabla 3.8 Rendimientos de la carbonización de la caña guadua a diferentes temperaturas y tiempos

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (h)	RENDIMIENTO (%)
400	1	34,8
	2	32,4
500	1	29,5
	2	27,4
600	1	25,5
	2	25,3

Por lo analizado en los ensayos a tiempo y temperatura fijo se determinó que a una temperatura de 600 °C y un tiempo de 1 hora es adecuado para la

carbonización de la caña guadua, ya que a estas condiciones se obtiene un carbón con la menor cantidad de material volátil y un rendimiento del 25,5% con un porcentaje de material volátil del 11,2% que son características del carbón mejores a las obtenidas a los 400 y 500 °C. Estas condiciones fueron las usadas en las pruebas a escala piloto que se describen en la siguiente sección.

3.2.2. PRUEBA A ESCALA PILOTO PARA LA CARBONIZACIÓN DE LA CAÑA GUADUA

Se procedió a realizar pruebas a escala piloto en el horno piloto Nichols Herreshoff usando las condiciones determinadas en la sección 3.2.1. Las pruebas a escala piloto se realizaron siguiendo los procedimientos descritos en la sección 2.2.2. Todos los cálculos y determinaciones realizados en esta sección se detallan en el Anexo IV.

3.2.2.1. Evaluación de la influencia de la agitación en la carbonización de la caña guadua a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff

Los resultados de la prueba a escala piloto para la carbonización sin agitación en la cámara se presentan a continuación en la Figura 3.11. La prueba se realizó con una temperatura de 600 °C al interior de la cámara, un factor $\lambda=0,9$ y durante un tiempo de 1 hora. Se realizaron 2 ensayos a escala piloto en el horno piloto, un ensayo donde se usó un lecho fijo donde reposó la materia prima y otro ensayo donde la materia prima estaba en constante movimiento por la acción de un agitador en la cámara del horno.

En la Figura 3.12. se observa la cinética de carbonización de la caña guadua a 600 °C y sin agitación en el horno piloto Nichols Herreshoff. Se observa que a los 15 minutos el porcentaje de carbón fijo ya alcanza el 69,01%. En comparación con la cinética de carbonización a 600 °C a escala laboratorio que se observa en la Figura 3.11. se aprecia que en el horno Nichols la carbonización es mucho más

rápida. Mientras que a escala piloto a los 15 minutos de carbonización se alcanza un porcentaje de carbón fijo de alrededor de 50,0%, en el horno piloto se alcanza el 69,0%. Esto se debe a que la transferencia de calor en el interior del horno y el control de la atmósfera reductora es mucho más eficiente que los ensayos realizados a nivel laboratorio en los crisoles de arcilla. Sin embargo el porcentaje máximo de carbón fijo obtenido al realizar la prueba piloto (73,9%) es inferior al porcentaje de carbón fijo obtenido para el mismo tiempo en la prueba a escala laboratorio (80,7%).

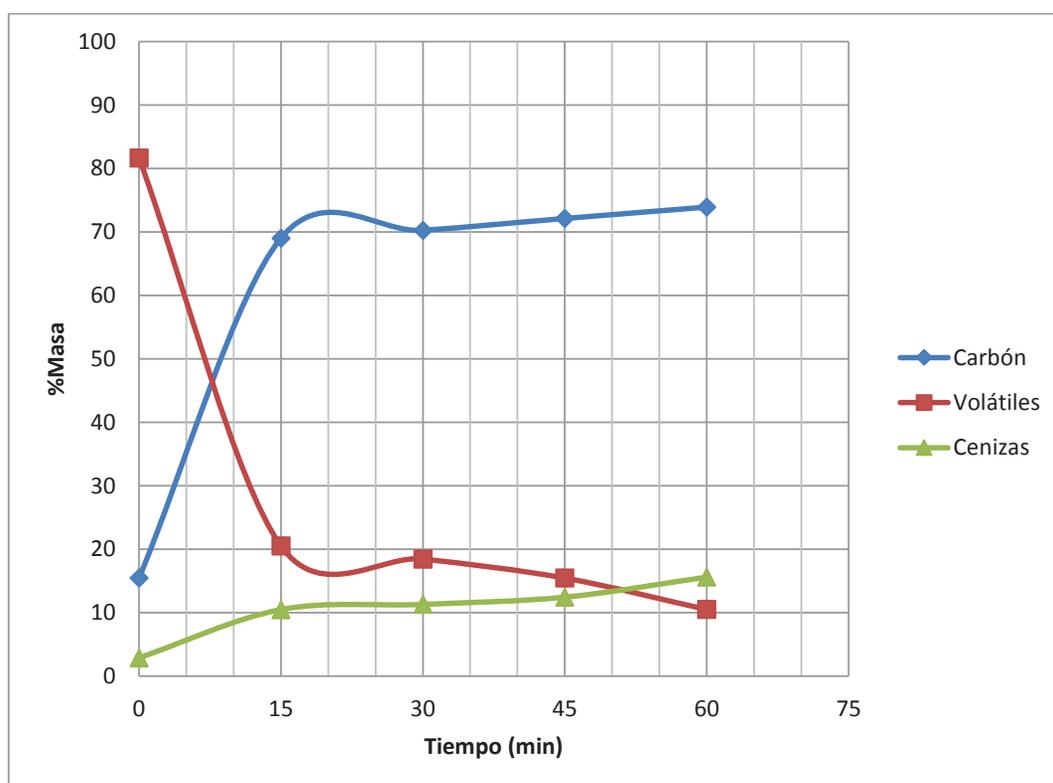


Figura 3.12. Cinética de carbonización de la caña guadua a 600 °C, sin agitación en el horno piloto Nichols Herreshoff

Esta variación en los resultados a escala laboratorio y piloto se debe principalmente a la cantidad de caña guadua usada en cada uno de los ensayos. Mientras que en la prueba a escala laboratorio no se usa más de 5 g, en la prueba a escala piloto se usan 2 kg de materia prima, lo que hace más complicada la eliminación de todos los elementos volátiles presentes. A pesar de lo antes

mencionado, el tiempo de 1 hora de carbonización es suficiente para alcanzar un material con un alto porcentaje de carbón fijo.

Los resultados de la prueba a escala piloto para la carbonización de la caña guadua con agitación en la cámara se presentan en la Figura 3.13. La prueba se realizó con una temperatura de 600 °C al interior de la cámara, un factor $\lambda=0,90$ y durante un tiempo de 1 hora. Se puede observar que la carbonización usando agitación al interior de la cámara del horno produce un carbón con un contenido de carbón fijo de 74,8% a los 30 min de operación del horno y a partir de este tiempo se mantiene estable este valor.

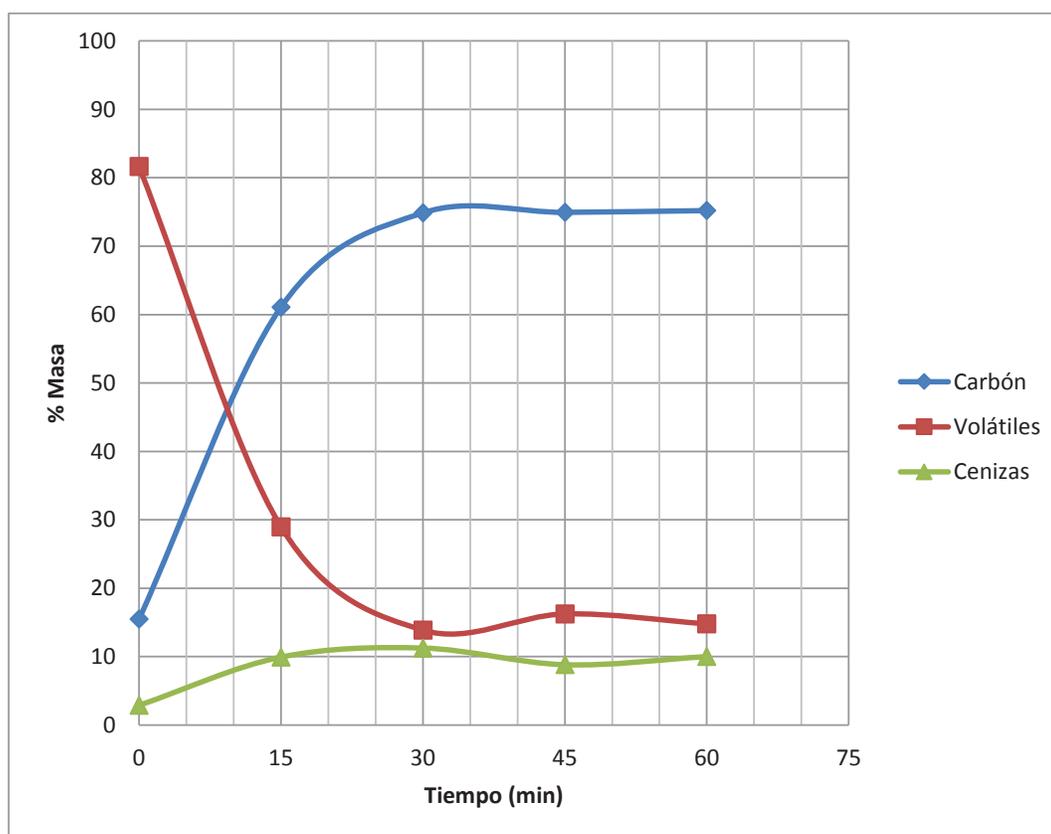


Figura 3.13. Cinética de carbonización de la caña guadua a 600 °C, con agitación en el horno piloto Nichols Herreshoff

La influencia de la agitación en la carbonización de la caña guadua a escala piloto se observa la calidad del carbón obtenido al finalizar el proceso. Para un tiempo de carbonización en el horno piloto de 30 minutos de operación, se obtienen

productos que contienen un porcentaje mayor al 70 % de carbón fijo. Sin embargo, en el ensayo donde se usa agitación en la cámara del horno piloto, el porcentaje es mayor (74,8%) en comparación al carbón obtenido usando donde solo se usa un lecho fijo en la cámara del horno. Este producto contiene solo un 70,2% de carbón fijo.

3.2.2.2. Caracterización de la estructura del carbón producido a escala piloto

El carbón producido en las pruebas a escala piloto se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido usando el microscopio Tescan-Bruker a diferentes grados de aumento. Las imágenes tomadas por el microscopio electrónico se muestran en la Figura 3.14. a y b.

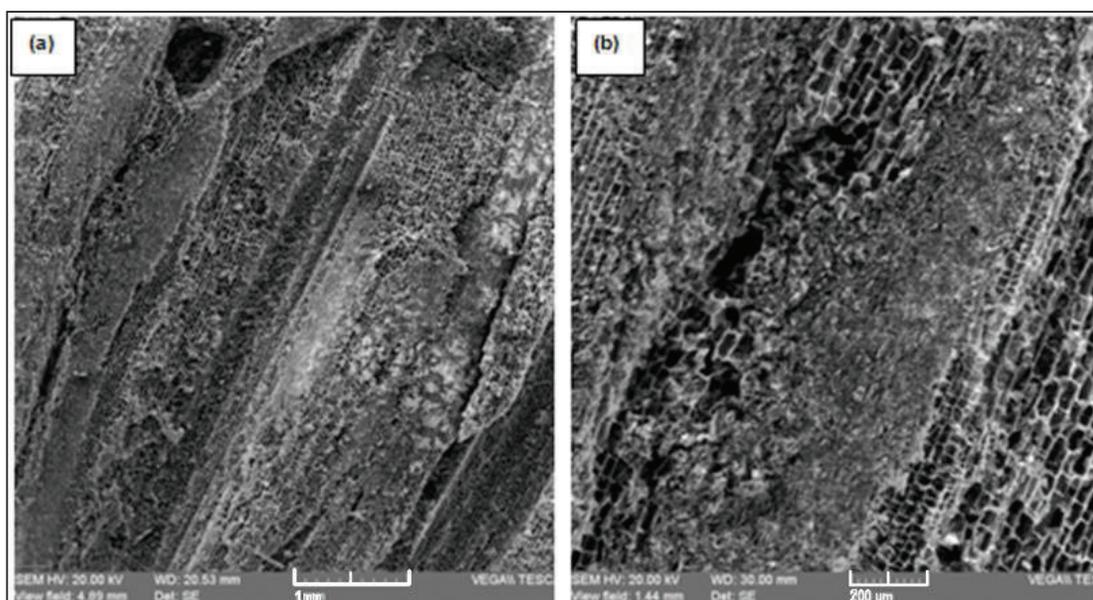


Figura 3.14. Fotografías MEB del carbón de la caña guadua obtenido a escala piloto a (a) mínimo aumento y (b) 150 grados de aumento

En las Figura 3.14. (a) se puede observar que la estructura ordenada de la caña guadua se sigue manteniendo aún después de haberse sometido al proceso de carbonización. Sin embargo esta estructura después de someterla a la carbonización se volvió sumamente frágil a diferencia de la materia prima que presenta una gran resistencia mecánica.

En la Figura 3.14. (b) se puede observar a más detalle el carbón formado a partir de la caña guadua. Si bien se conserva la estructura ordenada en forma de fibras largas que tiene la caña guadua antes de ser carbonizada, se observa también que se ha formado una estructura compuesta por una serie de celdas vacías contiguas. Estas celdas se forman debido a que el componente mayoritario de las paredes celulares es la lignina, que es el polímero más difícil de degradar o que es el que se degrada a altas temperaturas, por lo que queda fijado en la estructura del carbón. En cambio, por otro lado la celulosa y hemicelulosa, que son los componentes de la estructura interna de la caña guadua, es decir de las partes internas de las celdas se volatilizaron y dejan los huecos que se observan en las fotografías. De esta forma se forman estas estructuras en el carbón que entre las principales características hace que este pierda sus propiedades físicas como la dureza característica que tiene la caña guadua en un inicio, antes de ser carbonizada.

3.3. EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO DEL CARBÓN DE LA CAÑA GUADUA

La evaluación de los parámetros para la activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua se realizó siguiendo los procedimientos señalados en la sección 2.3. Luego de carbonizar la caña guadua, en lecho fijo y lecho agitado, se obtuvieron alrededor de 2 kg de carbón de caña guadua. Se usó este carbón para realizar las pruebas de activación química usando hidróxido de potasio grado reactivo (KOH).

Se realizaron pruebas a escala laboratorio para determinar la influencia de la temperatura, el tiempo y de la relación gramos de KOH sobre gramo de carbón de caña guadua (g KOH/g C.C.G.). A partir de los mejores resultados obtenidos en las pruebas a escala laboratorio se realizó una prueba a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff.

3.3.1. PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO PARA LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO DEL CARBÓN DE LA CAÑA GUADUA

Para evaluar la activación química del carbón de la caña guadua con hidróxido de potasio a escala laboratorio se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.3.1. donde se analizó la influencia de la temperatura, el tiempo y la relación (g KOH/g C.C.G.).

En los ensayos a escala laboratorio y escala piloto se usó el carbón a partir de la caña guadua producto de los ensayos a escala laboratorio y piloto mencionados en la sección anterior. El KOH usado fue de grado reactivo en forma de pellets con una pureza del 90%.

3.3.1.1. Análisis de la influencia de la temperatura en la activación química con hidróxido de potasio del carbón de la caña guadua

En la Figura 3.15. se observa la influencia de la temperatura en la activación química con KOH del carbón de la caña guadua.

Todos los carbones obtenidos en las pruebas a escala piloto fueron caracterizados determinando el índice de yodo según el procedimiento descrito en la sección 2.4.1.1. Se puede observar que a medida que incrementa la temperatura, el carbón de la caña guadua presenta mayor activación, alcanzando su valor máximo a los 800 °C, y al alcanzar los 900 °C la porosidad se reduce para las 3 relaciones g KOH/ g C.C.G. establecidas. Esto se comprueba según lo señalado por Marsh y Rodriguez-Reinoso (2006), donde señalan que a temperaturas que oscilan entre los 500 °C a 700 °C los carbones presentan grados de activación muy bajos, mientras que si la activación se da en el rango de temperaturas entre los 800 °C a 900 °C se aprecia un incremento muy evidente de la porosidad, considerando este rango de temperaturas como un rango crítico para la activación química usando KOH (p. 328).

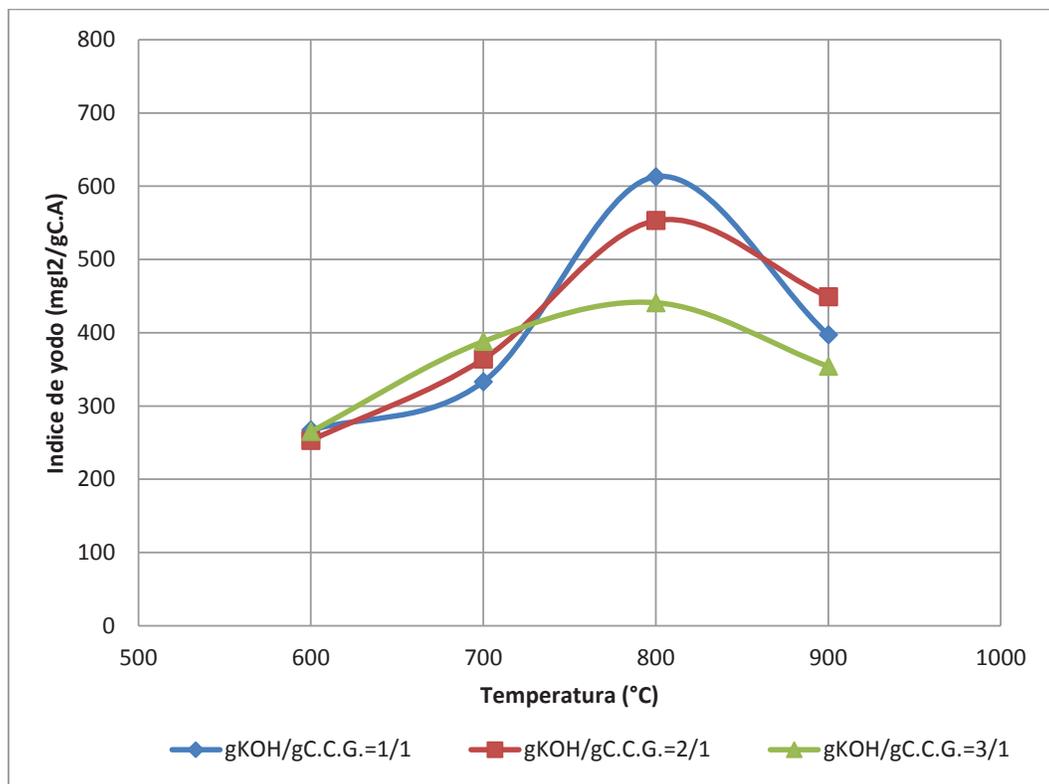


Figura 3.15. Análisis de la influencia de la temperatura en la activación química del carbón de la caña guadua

Se puede concluir que a la temperatura de 800 °C es donde más se desarrolla la porosidad en los carbones. Por otro lado también se observa que las relaciones de 1/1 y 2/1 de g KOH/g C.C.G son las que más porosidad desarrollan en el carbón, sobresaliendo claramente por encima de la relación 3/1, donde se alcanzan índices de yodo de 613 mg I₂/ g C.A. para la relación 1/1 y 553 mg I₂/ g C.A. para la relación 2/1. Por otro lado, a temperaturas inferiores a 800 °C no se da activación en el carbón de la caña guadua, resultado de esto son índices de yodo menores a 400 mg I₂/ g C.A. para todas las relaciones establecidas.

3.3.1.2. Análisis de la influencia del tiempo y de la relación g KOH/ g C.C.G. en la activación química del carbón de la caña guadua

La evaluación de la influencia de la relación g KOH/ g C.C.G. se realizó tomando en cuenta la mejor temperatura determinada en el análisis anterior donde se

obtuvieron los mejores índices de yodo, que fue a la temperatura de 800 °C. El analizar la influencia de la cantidad de hidróxido usado sirve para evaluar como aumenta la porosidad en el carbón a medida que se aumente o disminuya la cantidad de hidróxido usado. Sin embargo la relación de g. KOH/ g C.C.G. que se determina para la caña guadua no necesariamente puede ser usada en otros materiales carbonosos. De ahí que este estudio para la determinación de las condiciones óptimas de activación es necesario realizarlo para cualquier material precursor que se desee activar por este mecanismo químico. Por ejemplo, estudios como el de Jiménez et al. (2010) donde activan varios tipos de carbón (grafito, carbón amorfo y nano fibras de carbón) usando KOH como agente activante presentan diferentes grados de activación en cuanto a superficie específica. Este estudio presentó valores de superficie específica muy variados que fueron desde los 11,9 m²/g hasta los 2 157,0 m²/g. (p. 225).

En la Figura 3.16. se observa la variación del índice de yodo en función de la relación g KOH/ g C.C.G. realizado a una temperatura de 800 °C.

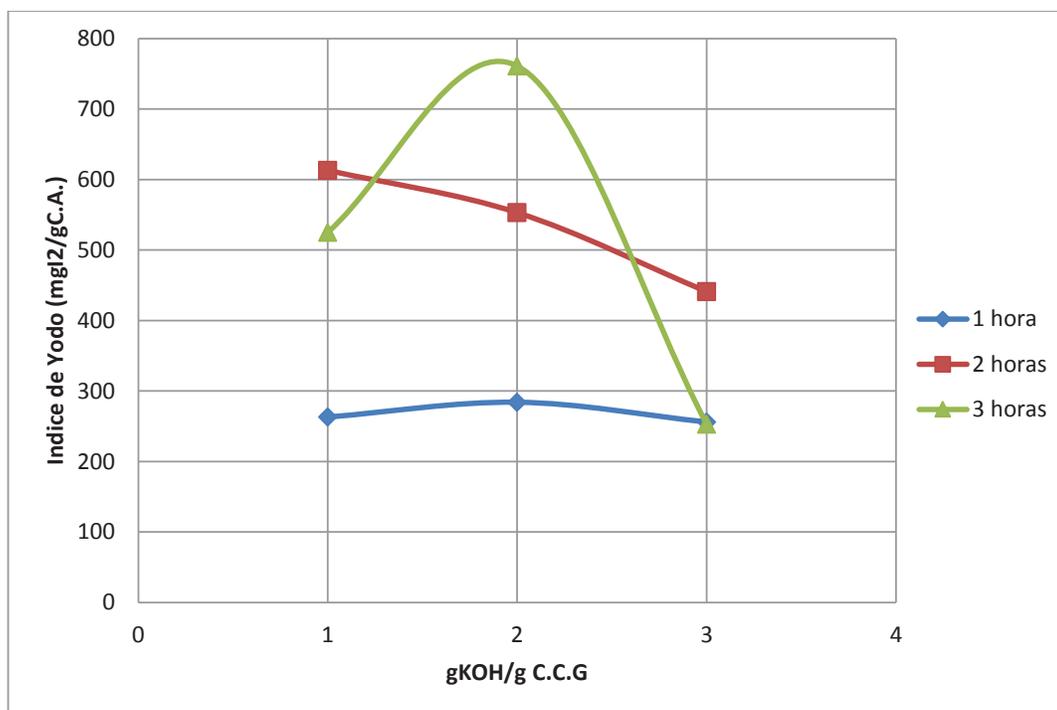


Figura 3.16. Análisis de la influencia de la relación g KOH/ g C.C.G. en la activación química del carbón de la caña guadua a temperatura de 800 °C

Se observa que los índices de yodo más altos obtenidos son a 2 horas para la relación 1/1 con un valor de 613 mg I₂/g C.A. y 3 horas para la relación 2/1 con un valor de 761 mg I₂/g C.A. A una hora de activación se observa que para las 3 relaciones analizadas no se aprecia un incremento en el índice de yodo. En los carbones activados que se usó la relación 3/1 se obtuvieron los índices de yodo más bajos en comparación con las otras 2 relaciones de activación. El mayor valor obtenido fue de 441 mg I₂/g C.A. para la relación 3/1. Se puede concluir que al aumento en la porosidad del carbón se da a partir de las 2 horas de activación a 800 °C, mientras que a 1 hora de ensayo todavía no se aprecia ningún incremento significativo en el índice de yodo.

En la Figura 3.17. se presentan los resultados del análisis de la influencia del tiempo en la activación química del carbón de la caña guadua usando KOH. En la figura se observan tres tendencias similares para las tres relaciones de g KOH/g C.C.G. aunque los picos de cada una de estas tendencias difieren en el valor máximo alcanzado.

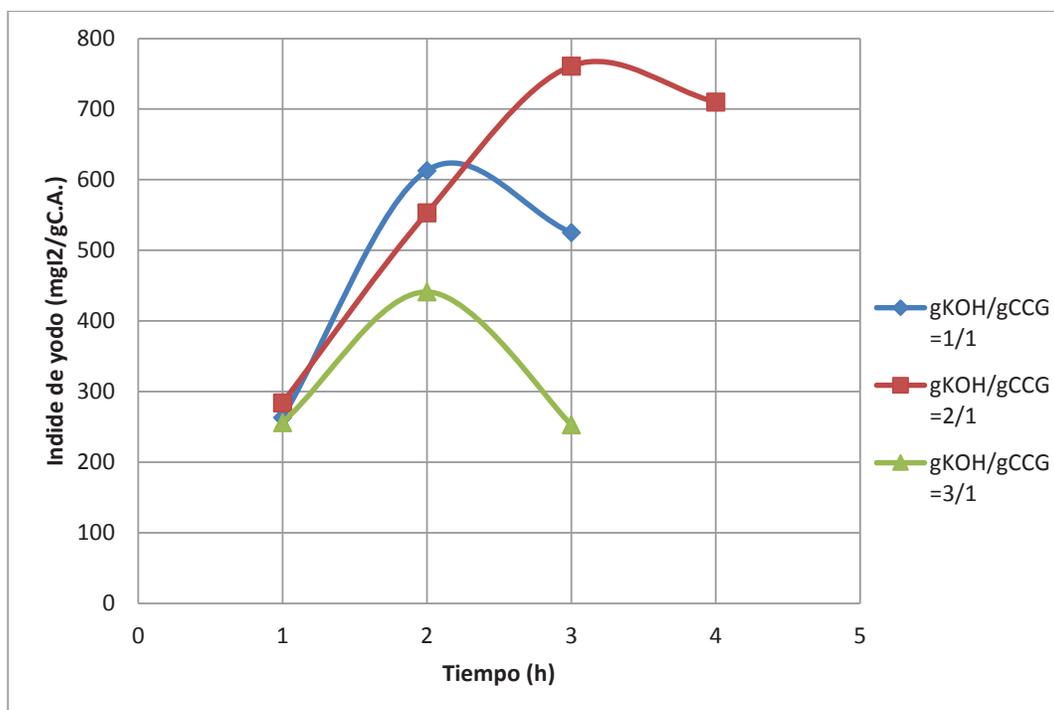


Figura 3.17. Análisis de la influencia del tiempo en la activación química del carbón de la caña guadua a temperatura de 800 °C

La influencia del tiempo no es la misma para las 3 relaciones g KOH/ g C.C.G. seleccionadas. Por ejemplo, a las 2 horas de activación, se observa que la relación 1/1 presenta índices de yodo más altos que las relaciones 2/1 y 3/1, donde el valor de índice de yodo más alto es de 613 mg I₂/g C.A. Sin embargo, la mayor porosidad desarrollada se alcanza a las 3 horas de activación con la relación 2/1, donde se obtiene un índice de yodo de 761 mg I₂/g C.A. que además es el valor más alto que se obtuvo en pruebas a escala laboratorio.

Adicionalmente se realizó un ensayo para 4 horas de activación química usando una relación g KOH/ g C.A. de 2/1 para evaluar cómo evoluciona el índice de yodo, pero en este caso descendió hasta un valor de 710 I₂/g C.A. Mientras que para la relación g KOH/g C.C.G. de 2/1 se obtuvo un índice de yodo de 761 mg I₂/g C.A., para las otras 2 relaciones se observó un descenso en el índice de yodo que llegó a los 525 mg I₂/g C.A. para la relación 1/1 y a los 253 mg I₂/g C.A. para la relación 3/1.

El descenso en los índices de yodo de los carbones activados producidos a partir de la tercera hora de activación usando las relaciones de activación 1/1 y 3/1 y a las 4 horas de activación para la relación 2/1. Este descenso en la porosidad se debe a varios fenómenos que se dan en la estructura del carbón activado durante el proceso de activación. Uno de ellos se dio en el momento de recuperar los carbones activados del fondo de los crisoles de arcilla. Se observó que los carbones se habían desintegrado completamente en polvo, perdiéndose así gran parte de la muestra sometida al proceso de activación. Este fenómeno también es mencionado por Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006) donde señalan que a relaciones altas de g KOH/g C.C.G. se observa que los carbones granulares se desintegran en polvo por efecto de la alta impregnación con el KOH (p. 328).

Por todo lo analizado se determinó que a 800 °C de temperatura, una relación g KOH/ g C.C.G. de 2/1 y un tiempo de 3 horas son las condiciones para producir carbón activado a partir del carbón de la caña guadua. Esto debido a que a estas condiciones se obtuvo el más alto índice de yodo (761 mg I₂/g C.A.) en las pruebas a escala laboratorio. Estas condiciones se las puso a prueba para lograr

la activación de 1 kg de carbón de caña guadua en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera.

3.3.2. PRUEBAS A ESCALA PILOTO PARA LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO DEL CARBÓN DE LA CAÑA GUADUA

Las pruebas a escala piloto se las realizó en el horno piloto Nichols Herreshoff mono solera. En el horno se activó 1 kg de carbón de caña guadua obtenido en el proceso anterior de carbonización. Para la activación química a escala piloto se usó las condiciones determinadas en las pruebas a escala de laboratorio mencionadas en la sección 3.3.1. Para la caracterización del carbón producido a escala piloto se realizaron los análisis mencionados en la sección 2.3.3. En la Tabla 3.9. se observan las condiciones de temperatura, tiempo y relación g KOH/g C.C.G. a las que se realizará la prueba a escala piloto y que se determinaron a partir de las pruebas a escala laboratorio.

Tabla 3.9 Condiciones de operación para la activación del carbón de caña guadua a escala piloto

Temperatura	800 °C
Relación g KOH/ g C.C.G.	2/1
Tiempo	3 horas

Se usó 2 kg de hidróxido de potasio grado reactivo para impregnar el carbón y posteriormente se realizó la activación química a escala piloto como se señala en la sección 2.5.3. El aumento de índice de yodo del carbón activado producido en función del tiempo se presenta en la Figura 3.18.

Se puede observar un aumento gradual del índice de yodo a medida que avanza el tiempo durante la activación química del carbón de la caña guadua. Si bien el tiempo de 3 horas determinado en las pruebas a escala laboratorio era el necesario para obtener el más alto índice de yodo, en la prueba a escala piloto se

prefirió realizar el ensayo hasta un tiempo de 5 horas para evaluar si existe o no aumento de la porosidad en un rango más amplio de tiempo. También debido a que el control de la atmósfera reductora en el horno piloto es mucho más eficiente y la cantidad de muestra usada es la suficiente para poder realizar esta evaluación. Sin embargo se empieza a ver una estabilización de los valores de índice de yodo a partir de la cuarta hora de operación del horno.

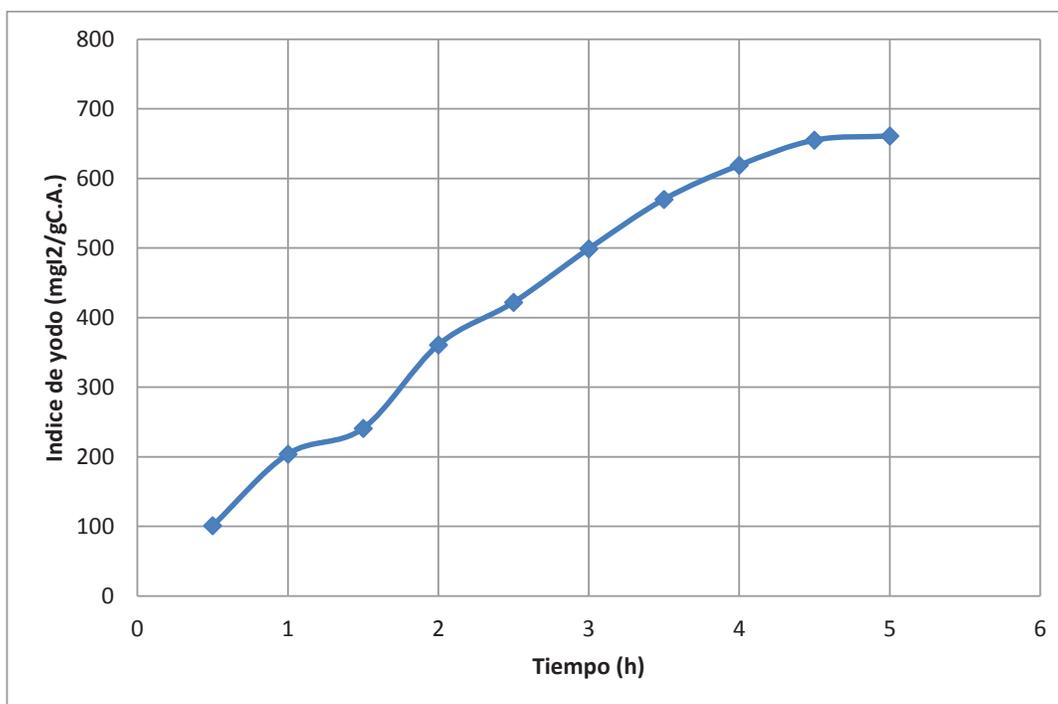


Figura 3.18. Cinética de activación química a escala piloto en el horno Nichols Herreshoff del carbón de la caña guadua usando KOH

El valor más alto índice de yodo alcanzado es de 661 mg I₂/g C.A. a las 5 horas de ensayo, pero este valor tiende a estabilizarse a partir de la cuarta hora de ensayo como se mencionó anteriormente. Este valor obtenido sin embargo no es mayor al valor obtenido en las pruebas de activación química realizadas a escala laboratorio. En estas pruebas se alcanzó un índice de yodo máximo de 761 mg I₂/g C.A. De la misma forma que sucedió en las pruebas a escala laboratorio se observó que el carbón se desintegró en polvo, sin embargo estas muestras fueron posibles recogerlas debido a que se trabajó en el lecho fijo del horno y no hubo una gran pérdida de muestra en este caso.

Se realizó también una prueba a escala piloto para la activación de 1 kg de carbón de cuesco de palma usando las mejores condiciones determinadas para el estudio de activación química del carbón de caña guadua. Sin embargo en esta prueba no se obtuvieron resultados positivos de la activación. El carbón de cuesco de palma sin activar tenía un índice de yodo inicial de 331 mg I₂/ g C.A. Al cabo de las 5 horas de carbonización en el horno Nichols Herreshof a 800 °C no se observó variación en el índice de yodo del carbón de cuesco de palma. Con base en estos resultados se concluye que para la activación química con KOH, habrá una relación de g KOH/ g. C.C.G, tiempo y temperatura de activación únicas para cada carbón producido, es decir que cada precursor tiene sus propias condiciones para lograr la activación del carbón usando KOH.

Considerando los resultados obtenidos se puede recomendar que para próximos estudios de activación química usando KOH para carbones de otros materiales lignocelulósicos se debe realizar un estudio para la determinación de la relación óptima de g KOH/ g C.C.G., tiempo y temperatura para lograr un desarrollo de porosidad.

3.3.2.1. Índice de azul de metileno

El índice de azul de metileno es un indicador de la meso porosidad que ha desarrollado el carbón activado durante el proceso de activación. Para su determinación se realizó el procedimiento señalado en la sección 2.3.3.1. Se realizaron las pruebas a muestras de carbón activado a escala laboratorio, piloto y carbón sin activar.

En la Tabla 3.10. se observan los resultados del ensayo de índice de azul de metileno realizados a muestras de carbón activado de la caña guadua a escala piloto (CACG1), a escala laboratorio (CACG2) y de carbón sin activar de la caña guadua (CCG1). Los datos presentados en la Tabla 3.10. indican que el carbón CACG1 producido a escala piloto tiene una absorbancia de 0,31 y el carbón CACG2 producido a escala laboratorio tiene una absorbancia de 0,29.

Estos resultados señalan que los carbones activados químicamente con KOH a partir de la caña guadua tienen una meso porosidad baja debido al valor de absorbancia que presentan en ambos casos. Estos 2 carbones fueron producidos bajo las mismas condiciones de temperatura (800 °C) y de relación g KOH/ g C.C.G (2/1) pero a diferentes tiempos de activación

Tabla 3.10. Índice de azul de metileno para carbones activados de caña a escala piloto (CACG1), escala laboratorio (CACG2) y carbón sin activar (CCG)

Muestra	Absorbancia	g Azul de Metileno/ g C.A.
CACG1	0,31	8,24
CACG2	0,29	9,59
CCG	0,4	2,16

El valor más bajo de absorbancia, que presenta el carbón activado a escala laboratorio CACG2, nos indica que este carbón logró remover más cantidad de metileno de la solución madre en comparación al carbón activado CACG1 producido a escala piloto. Sin embargo ninguno de estos carbones logró decolorar completamente la solución de metileno. Se concluye que la diferencia entre las decoloraciones que presentan estos 2 carbones analizados se debe a que los carbones producidos a escala laboratorio tuvieron mayor grado de activación que los producidos a escala piloto y se comprobó inicialmente cuando se observó que el índice de yodo era más alto en los carbones producidos a escala laboratorio. Por otro lado el carbón sin activar CCG presenta un alto valor de absorbancia, que llega hasta 0,4 lo que quiere decir que la solución inicial de metileno no fue alterada al ponerla en contacto con el carbón sin activar.

3.3.2.2. Decoloración del jarabe de azúcar

La decoloración de jarabe de azúcar es un índice de la macro porosidad que ha desarrollado el carbón activado durante el proceso de activación. Para su determinación se realizó el procedimiento señalado en la sección 2.3.3.2. Se

realizaron las pruebas a muestras de carbón activado a escala laboratorio, piloto y carbón sin activar. En la Tabla 3.11. se observan los resultados del ensayo de la decoloración de jarabe de azúcar realizados a muestras de carbón activado de la caña guadua a escala piloto (CACG3), a escala laboratorio (CACG4) y de carbón sin activar de la caña guadua (CCG1).

Tabla 3.11. Índice de decoloración de azúcar para carbones activados de caña guadua producidos a escala piloto (CACG3), escala laboratorio (CACG4) y carbón sin activar (CCG)

Absorbancia (nm)	CACG3	CACG4	CCG
430	0,19	0,18	0,20
710	0,49	0,75	0,83
UBR	189,2	178,5	198,3

Como se observa en la Tabla 3.11. el valor de UBR más bajo es el obtenido con la muestra de carbón activado producido a escala laboratorio CACG4 que da un valor de 178,5 pero sin embargo no es un valor muy distante del valor UBR de la solución estándar de sacarosa que fue de 201,3. Esto quiere decir que la activación química del carbón de la caña guadua usando KOH no genera macro porosidad en la estructura del carbón, tanto a escala laboratorio como escala piloto.

3.3.2.3. Caracterización de los grupos funcionales de superficie mediante espectrometría infrarroja con transformada de Fourier

La caracterización de los grupos funcionales de superficie se realizó según el procedimiento descrito en la sección 2.3.3.3. Esta determinación se realizó usando la técnica de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR). En la Figura 3.19. se observa el espectro infrarrojo obtenido de una muestra de carbón activado de caña guadua producido a escala piloto. La caracterización de los grupos funcionales en la superficie del carbón sirve para determinar que radicales orgánicos están presentes en la superficie del carbón luego del proceso de activación.

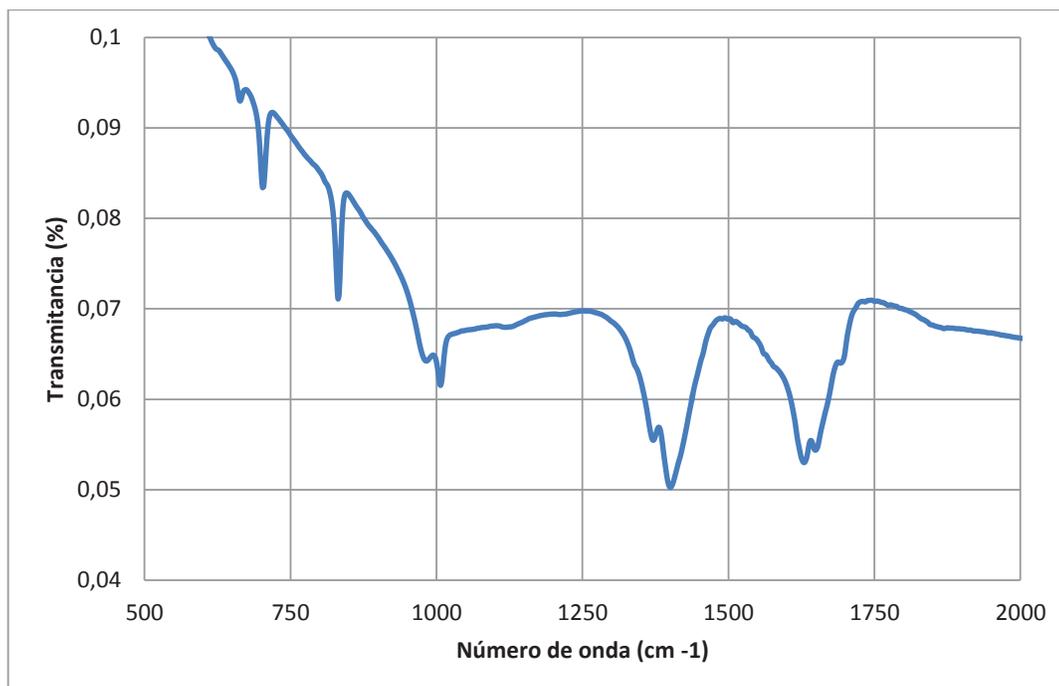


Figura 3.19. Espectro FTIR de una muestra de carbón activado de caña guadua producido a escala piloto

En la Figura 3.19. se puede observar 5 bandas definidas que corresponden a 5 grupos funcionales diferentes que se identificaron en la superficie del carbón. Las bandas que se encuentran entre los 670 y 780 cm^{-1} corresponden a grupos C-H. La banda a 1050 cm^{-1} corresponde a grupos ésteres simétricos de la forma R-C-R. La banda que se ubica alrededor de los 1350 cm^{-1} se debe al estiramiento del grupo C-O presente en xantenos o ésteres. Por último, la quinta banda ubicada alrededor de los 1600 cm^{-1} corresponde a la presencia de C=O asociados a grupos carbonilos o quinonas.

3.3.2.4. Determinación de la superficie específica, tamaño y volumen de poro del carbón activado a escala piloto

La determinación de la superficie específica BET, tamaño de poro y volumen de poro del carbón activado a escala piloto se realizó según el procedimiento descrito en la sección 2.3.3.4. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Resultados de superficie específica BET, diámetro de poro y volumen máximo de poro para el carbón producido a escala piloto

Parámetro	Resultados	Unidades
Superficie Específica BET	503,42	m ² /g
Diámetro de poro	29,0178	Å
Volumen máximo de poro	0,2324	cm ³ /g

Como se observa en la Tabla 3.12. se comprueba que la activación química usando KOH produce microporos en la estructura del carbón de la caña guadua. Estos resultados obtenidos corroboran los resultados obtenidos previamente analizados mediante la determinación del índice de azul de metileno y de decoloración de azúcar donde también se concluyó que la activación química usando KOH produce en su mayoría microporos en la estructura del carbón y no produce un desarrollo de macro y microporosidad apreciable. Algunos estudios también señalan este comportamiento como Duranoglu y Beker (2013) donde activan endocarpio de durazno con KOH produciendo carbones altamente microporosos. (p. 1004).

En la Figura 3.20. se observa la isoterma de adsorción obtenida durante el análisis BET de la muestra de carbón de caña guadua producido a escala piloto. Se observa que la isoterma obtenida es una isoterma del tipo II, es decir una isoterma que corresponde a materiales no porosos. Esto indica que el carbón producido a escala piloto no es un material poroso pero, sin embargo, si presenta un desarrollo de microporos que se puede observar en los valores de superficie BET obtenida y en el tamaño de poro, valores que se presentaron en la Tabla 3.12. De todas formas, el carbón producido no es un material altamente poroso porque de darse este caso debería describir una isoterma del tipo I, típica de materiales porosos como el carbón activado de cuesco de palma. Un estudio de activación química de la cáscara de arroz usando KOH y NaOH como agentes activantes también presentan isotermas de adsorción similares a la presentada en la Figura 3.20.

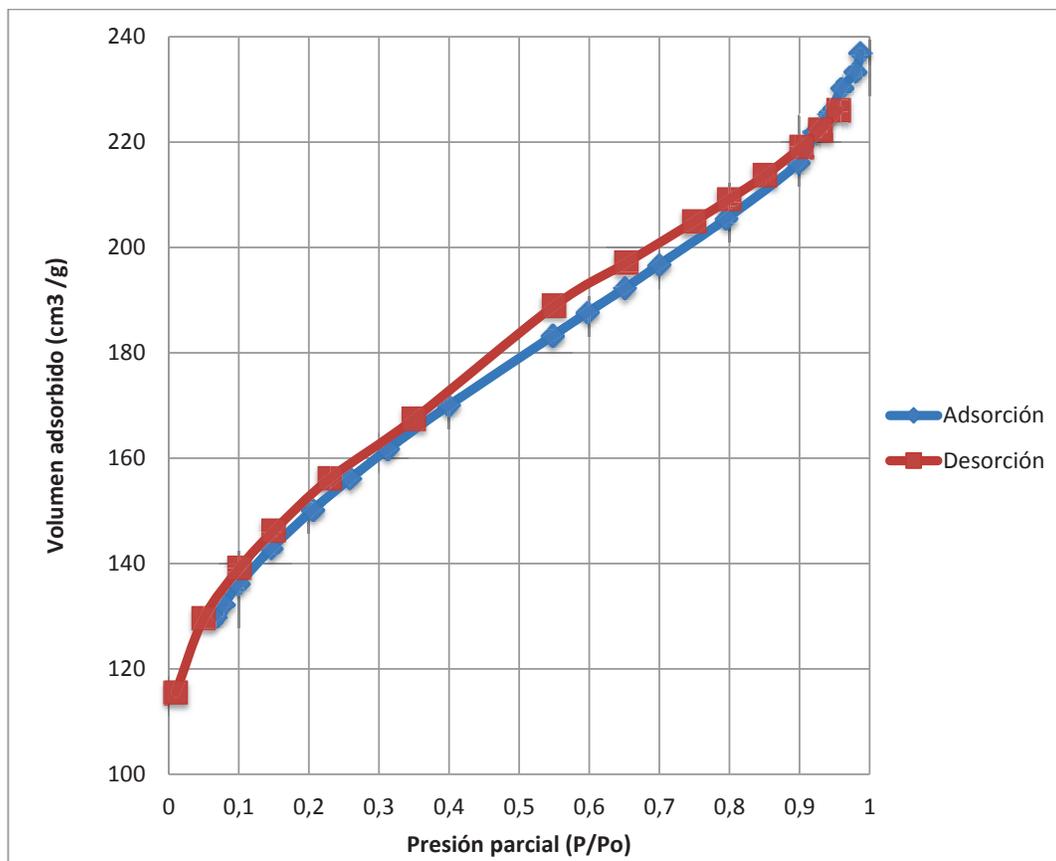


Figura 3.20. Isotermas de adsorción y desorción de N_2 del carbón activado de la caña guadua usando KOH a escala piloto

Los carbones que presentan este tipo de isotermas como la observada en la Figura 3.20. fueron los carbones con menor grado de activación y menor superficie específica, pero sin embargo con una gran distribución de microporos, lo que una vez más confirma que el uso de hidróxidos, en este caso de KOH y NaOH, genera la formación de microporos en la estructura del carbón. (Muniandy, Adam, Mohamed y Ng, 2014, p. 320).

En la Figura 3.21. se observa la distribución de poros que tiene el carbón activado de la caña guadua obtenido a escala laboratorio. Se observa la distribución del diámetro de poros del carbón activado como una función del volumen de poro que posee el carbón. Como se observa los poros desarrollados durante la activación están entre los 5 Å y 6 Å una región de microporos donde se encuentran los dos picos de la curva.

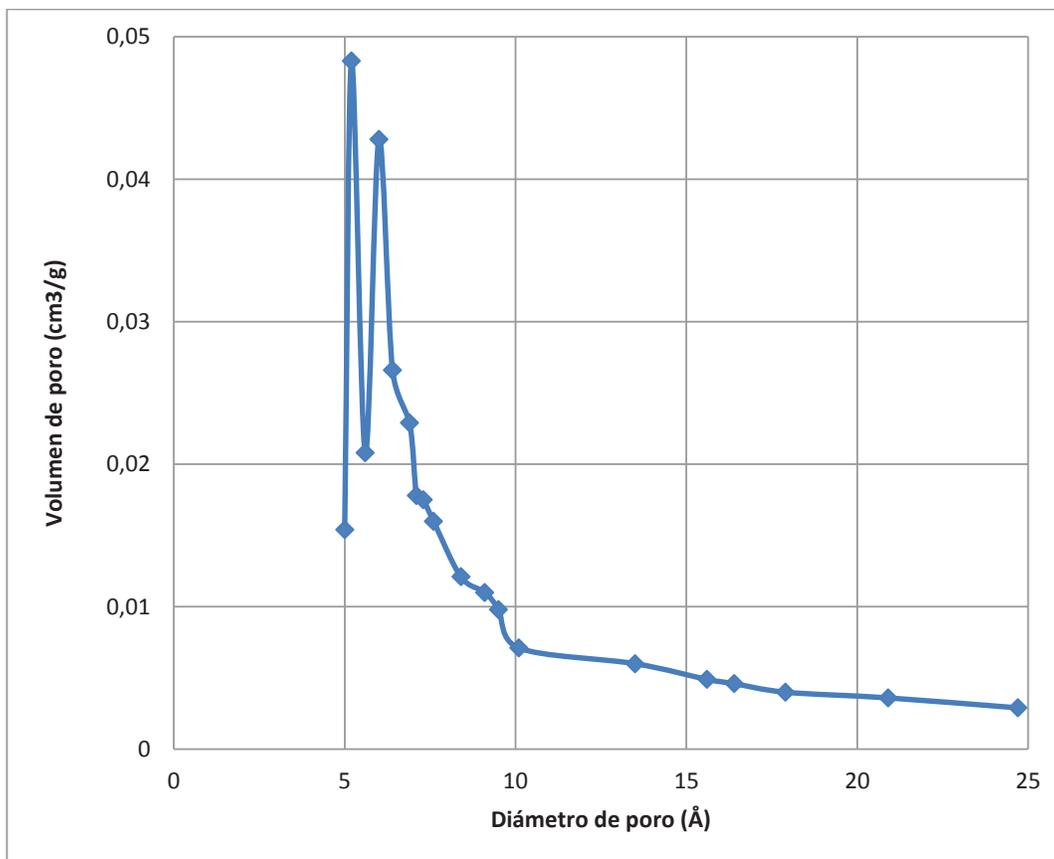


Figura 3.21. Distribución de diámetro de poro para el carbón activado de la caña guadua usando KOH a escala piloto

3.3.2.5. Caracterización de la estructura del carbón activado producido a escala piloto

Las imágenes tomadas por el microscopio electrónico de barrido Tescan-Vega de una muestra de carbón activado de caña guadua se muestran a continuación en la Figura 3.22. a y b. En la Figura 3.22.(a) se puede observar imágenes de la estructura del carbón activado químicamente usando KOH a 500 grados de aumento mientras que en la Figura 3.22. (b) están a 700 grados de aumento.

Como se puede observar en las Figuras 3.22. (a) y (b), la estructura ordenada que presentaba al inicio el carbón de la caña guadua se ha perdido y ya no se observan las fibras longitudinales continuas. Más bien en su lugar se ve una estructura más desordenada con una gran cantidad de poros.

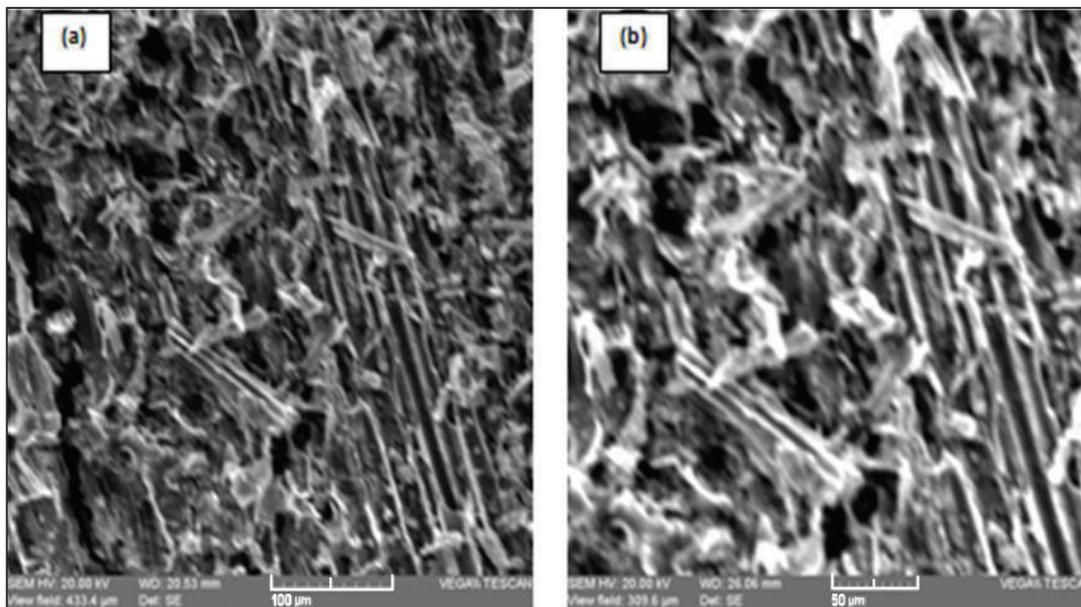


Figura 3.22. Fotografías MEB del carbón activado de caña guadua obtenido a escala piloto a (a) 500 aumentos y (b) 700 aumentos

En la Figura 3.22. (a) se observa las fracturas que se forman en la estructura del carbón producto del fenómeno de desorción del ión K^+ de la superficie del carbón que es lo que va dando lugar a la porosidad. Estas grietas formadas en la estructura del carbón tienen un tamaño menor de 50 nm como se observa en la escala de la imagen. Al darse el proceso de desorción, el ión intercalado va dando lugar a la formación de poros en la estructura del carbón.

En la Figura 3.22. (b) se observa a más detalle los mesoporos formados. De igual forma se observa que los poros tienen un tamaño menor de 50 nm, así que lo que se observa en las imágenes son mesoporos formados en la estructura del carbón. También en esta figura se observa a más detalle como la estructura del carbón activado se vuelve más desordenada en comparación con las Figuras 3.14. (a) y (b) donde se observaba el carbón si activar de la caña guadua.

En la Figura 3.23. se puede observar los microporos formados en la estructura del carbón de la caña guadua. Se puede observar los poros generados en la superficie del carbón y que su tamaño va desde los 2 nm o menos, usando la escala que se presenta en la imagen.

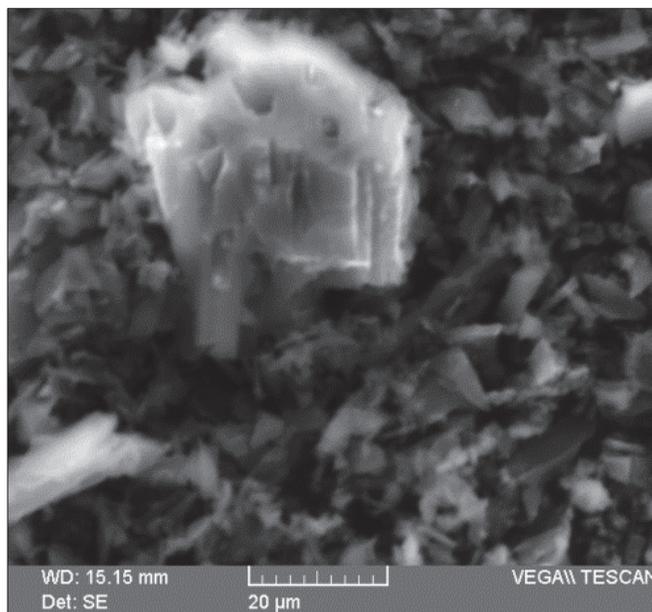


Figura 3.23. Fotografía MEB del carbón activado de caña guadua obtenido a escala piloto a 1800 aumentos

Estos poros se pueden catalogar como micro poros y que comprueba el desarrollo de micro porosidad durante el proceso de activación química con KOH, comprobando los resultados obtenidos mediante la determinación del índice de yodo en las secciones anteriores.

3.4. DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE 10 T/MES DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA CAÑA GUADUA MEDIANTE ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO Y EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA

Una vez determinadas las condiciones para producir carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química usando hidróxido de potasio (KOH) se planteo el diseño de una planta para la producción industrial de 10 t/mes de carbón activado mediante el método propuesto. Además se realizó una evaluación económica para determinar la factibilidad de instalar una planta de

producción industrial del carbón activado. Para esto se dimensionó el sistema de reducción de tamaño de la caña guadua, los tanques de impregnación y recirculación del carbón con el KOH, los filtros de recuperación del carbón impregnado y activado, tanques de almacenamiento, el horno rotatorio que servirá para la carbonización y la activación y el sistema para acondicionar el producto terminado para su distribución.

3.4.1. LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA

La planta se localizará en el sector de Pomasqui, al norte de la ciudad de Quito, en la provincia de Pichincha. Se seleccionó esta localización de la planta debido a las facilidades que se tiene con respecto a la disponibilidad de servicios industriales tales como agua potable y electricidad. Además el sector tiene cercanía con las zonas de donde se obtendrá la materia prima, facilitando así su ingreso y su posterior comercialización una vez terminada la producción.

Otra ventaja de la ubicación seleccionada es que consta de amplias vías de acceso para la entrada de materia prima y la salida del producto terminado. En el sector también existen otras industrias por lo que las facilidades de servicios industriales e insumos estarían cubiertas al elegir esta ubicación.

3.4.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIA PRIMA, INSUMOS, SERVICIOS INDUSTRIALES Y PRODUCTO TERMINADO

Como primera etapa del diseño de la planta de carbón activado se plantea la caracterización de la caña guadua como materia prima, sus principales características y de donde se la va a conseguir para el funcionamiento de la planta; del hidróxido de potasio (KOH) y el agua como insumos; electricidad, agua y combustible como servicios industriales; y las características que debe cumplir el carbón activado como producto final del proceso.

3.4.2.1. Materia prima

- **Caña guadua:** La materia prima es la caña guadua (*Guadua angustifolia* K.) obtenida de la zona noroccidental de la provincia de Pichincha, exactamente de la zona de Nanegal.

Según datos de un estudio realizado por la USAID (2006), existen dos principales zonas en la provincia de Pichincha y una en la provincia de Santo Domingo de los Tsachilas donde se produce caña guadua a grandes escalas y que se consideran adecuadas para la propuesta planteada. Estas zonas son: el cantón Cayambe, la población de San Miguel de los Bancos y la población de Santo Domingo de los Colorados. (p. 6). En la Tabla 3.13 se observa la producción de caña guadua de cada una de las zonas mencionadas. Se han seleccionado estas 3 zonas por la cercanía que tienen a la zona donde se recolectó la materia prima, esperando así que se guarde similitud entre sus características físicas y químicas. Además estas tres zonas consideradas son las más cercanas a la zona donde se instalará la planta, reduciendo así costos en el transporte de la materia prima.

Tabla 3.13. Zonas de producción de caña guadua identificadas en la provincia de Pichincha (USAID, 2006, p. 8)

ZONAS	PRODUCCIÓN [CAÑAS/MES]	PRECIO [USD/CAÑA]
Sector de Cayambe	2 000	0,65
Sector de San Miguel de los Bancos	5 000	0,54
Sector de Santo Domingo de los Colorados	2 000	0,66

Una caña guadua pesa aproximadamente 5 kg, según los pesos registrados de las muestras usadas en el inicio de este estudio. Entre las tres zonas de producción se obtienen alrededor de 45 t/mes. A partir de los datos de rendimiento del proceso de carbonización, que fue del 26,6%, y del proceso de activación, que fue del 89,6%, se determinó que se producirá alrededor de 10 644

kg de carbón activado, con lo que se cubre la producción determinada en el inicio de este proyecto

3.4.2.2. Insumos

Los insumos que se usarán para el diseño de esta planta es el hidróxido de potasio de grado reactivo y el agua que se usará en el proceso de impregnación. A continuación se describen a detalle las características de los insumos mencionados.

- **Hidróxido de Potasio GR (KOH):** El KOH es usado como agente de activación del carbón producido a partir de la caña guadua, que se lo hace mediante impregnación en fase acuosa. Se lo comercializa en forma de pastillas y posee una pureza mayor del 85% con alrededor de un 2% de impurezas que en su mayoría es carbonato de potasio (K_2CO_3). La empresa ecuatoriana Elicrom proveerá esta materia prima a un costo de 52,64 USD/kg.
- **Agua:** El agua es usada en el proceso de impregnación del carbón producido y también en el proceso de lavado del carbón activado para la recuperación del KOH. El agua será tomada de la red municipal de agua potable de la ciudad de Quito y posteriormente destilada. El costo del suministro de agua a partir de un consumo mayor a los 31 m³ es de 0,43 USD/m³.

3.4.3. DIAGRAMAS BFD Y PFD DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA CAÑA GUADUA

Con base en los resultados de rendimiento del proceso de carbonización de la caña guadua y del proceso de activación usando KOH se estableció un diagrama BFD donde se esquematiza el proceso para producir alrededor de 10 t/mes de carbón activado con un índice de yodo de 661 mg I₂/ g C.A. En la Figura 3.24. se observa el diagrama BFD mencionado.

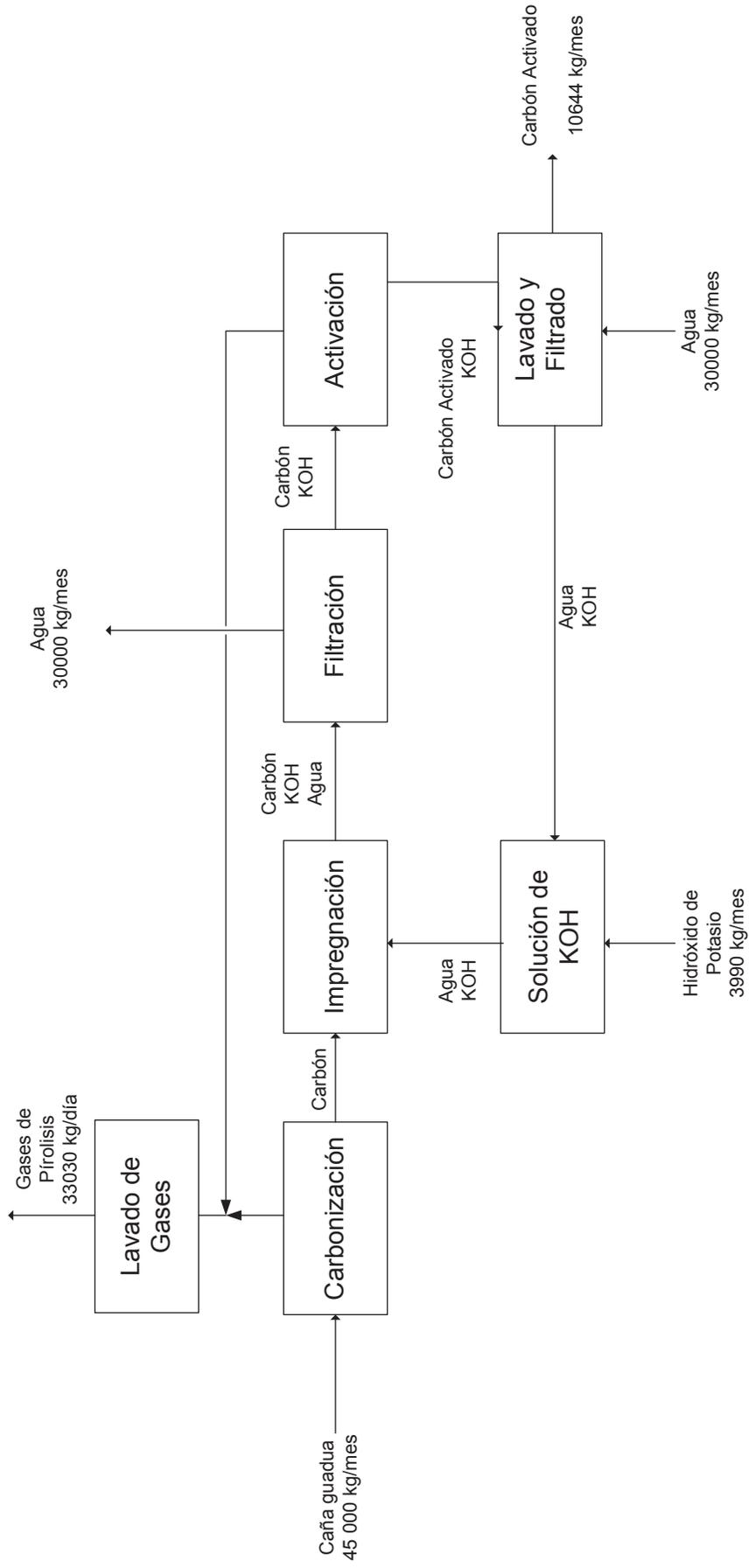


Figura 3.24. Diagrama BFD Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua

Como se mencionó en el punto 3.4.2.1, la planta tendrá una capacidad para procesar alrededor de 9 000 cañas guaduas al mes, trabajando en un régimen de 24 horas continuas. Solo se considera las pérdidas que corresponden a los procesos de carbonización y activación, ya que el proceso de reducción de tamaño no se considera en este estudio.

Las cañas guaduas que ingresan a la planta reducidas de tamaño previamente ingresan al primer proceso que es el proceso de carbonización. Son pirolizadas a una temperatura de 600 °C obteniéndose así alrededor de 11 970 kg de carbón de caña guadua. Posteriormente el carbón obtenido es mezclado con alrededor de 23 940 kg de KOH grado técnico. El contacto entre el KOH y el carbón se da en fase acuosa, por esta razón se necesitan alrededor de 180 m³ de agua por mes para la preparación de las soluciones con KOH y lograr un contacto íntimo entre el carbón de caña guadua y el hidróxido. Para esto se usarán tanques agitados que permitan establecer este contacto. Tanto el agua y la mayoría del KOH son reciclados en procesos posteriores con el fin de evitar altos gastos con el consumo de estos y menor consumo de agua de la zona.

Posterior a la impregnación del KOH, el carbón impregnado es filtrado y separando el agua que contiene el KOH disuelto que no se ha impregnado en el carbón. Posterior a esto, el carbón impregnado pasa al proceso de activación. En este proceso se piroliza el carbón impregnado a una temperatura de 800 °C. A la salida de este proceso se obtiene 10 644 kg de carbón activado junto con 21 450 kg de KOH impregnado en la superficie del carbón. Para recuperar el KOH se lava al carbón activado con el agua separada del proceso de impregnación. Esta solución es llevada a un proceso de acondicionamiento donde se agrega el KOH perdido durante la activación. A la salida del proceso de lavado ya se tiene carbón activado con un índice de yodo mayor a 600 mg/g, cumpliendo con la norma INEN 1991 que hace referencia las especificaciones de calidad de los carbones activados (INEN, 1995, p. 3).

En la Tabla 3.14. se detalla la lista de equipos de los que consta la planta con su respectiva identificación.

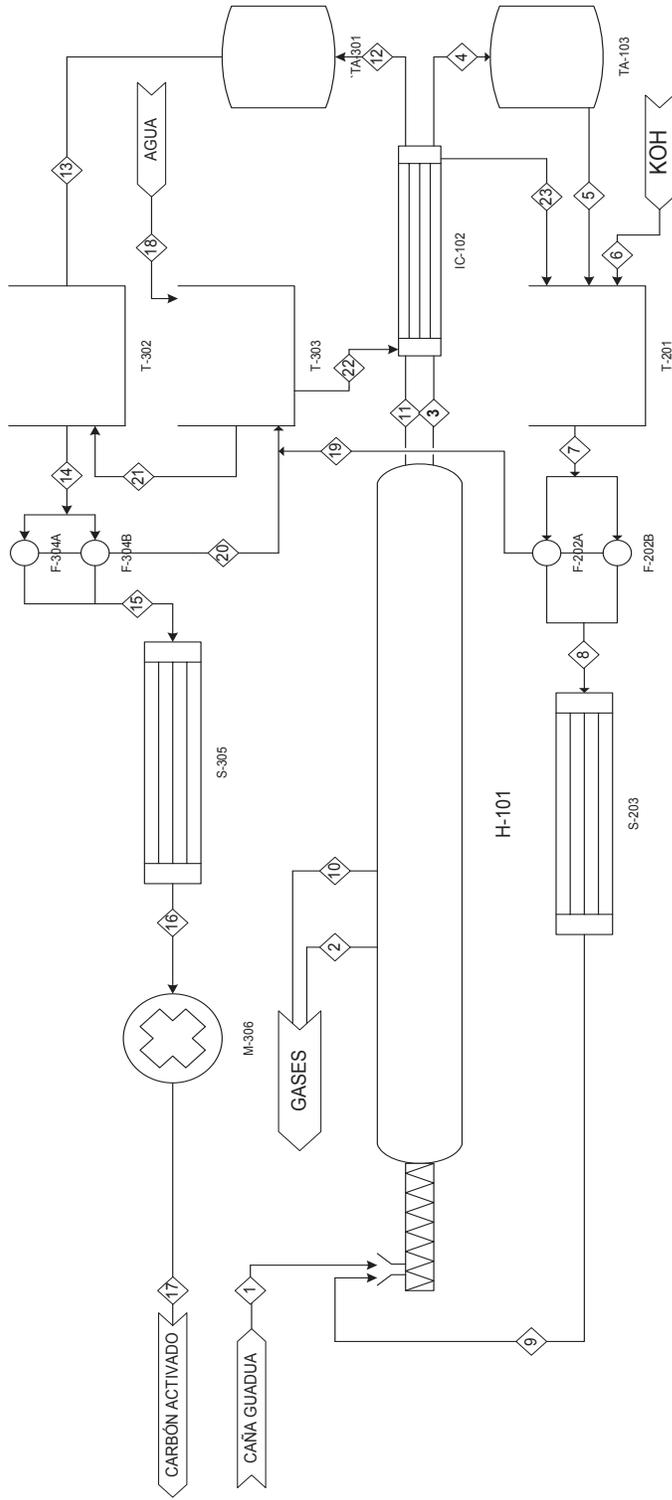
Tabla 3.14. Lista de equipos de la planta de producción de carbón activado

EQUIPO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN
Horno rotatorio de pirólisis	H-1
Cámara de enfriamiento del carbón	IC-102
Silo de almacenamiento de carbón	TA-103
Tanque de mezcla carbón-KOH	T-201
Filtro de presión	F-202 A/B
Secador de carbón impregnado	S-203
Silo de almacenamiento de carbón activado	TA-301
Tanque de lavado de KOH	T-302
Tanque de almacenamiento de agua	T-303
Filtro de presión	F-304 A/B
Secador de carbón activado	S-305
Molino de martillos	M-306

En la Figura 3.25. se observa el diagrama PFD del proceso de producción de carbón activado a partir de la caña guadua usando KOH como agente activante.

- **Descripción detallada del proceso de producción**

La materia prima es almacenada y reducida de tamaño mediante sierras eléctricas en la zona de materia prima. Aquí las cañas son reducidas hasta un tamaño de 1 cm aproximadamente y acumuladas en pilas stock. Toda la materia prima ingresa al horno rotatorio de pirólisis H-101 donde se produce el carbón de la caña guadua. Este horno opera a 600 °C, 24 horas al día durante los primeros 14 días del mes hasta producir el suficiente carbón para la producción de las 10 t/mes de carbón activado. Posteriormente el carbón es enfriado en la cámara de enfriamiento IC-102 hasta temperatura ambiente. Esta cámara es un intercambiador concéntrico que usa agua como fluido refrigerante y enfría el carbón para que este no se combustione inmediatamente a la salida del horno H-101.



		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Unidades		25	600	600	25	25	25	92	92	800	800	800	25	25	25	25	25	25	25	92	25	25	25	23
TEMPERATURA	(°C)																							
ESTADO	S/L/G	S	G	S	S	S	S	S	S	G	S	S	S	S	L/S	S	S	S	L	L	L	L	L	L
CAÑA GUADUA	kg/mes	3750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CARBÓN	kg/mes	0	0	997,5	997,5	997,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CARBÓN IMPREGNADO	kg/mes	0	0	0	0	0	0	997,5	997,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CARBÓN ACTIVADO	kg/mes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	887	887	887	887	887	887	887	887	0	0	0	0	0	0
KOH	kg/mes	0	0	0	0	0	0	0	1995	1995	0	1787,5	1787,5	1787,5	1787,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGUA	kg/mes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GASES DE PIROLISIS	kg/mes	0	2752,5	0	0	0	0	0	0	1326	0	0	0	0	0	0	0	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000
TOTAL	kg/mes	3750	2752,5	997,5	997,5	997,5	1995	2992,5	2992,5	1326	2674,5	2674,5	2674,5	2674,5	17674,5	887	887	887	15000	15000	15000	15000	15000	15000

Escuela Politécnica Nacional
Figura 3.25. Diagrama PFD
 Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua
 Diego Andrade
 Fecha 20/04/2015
 Página 1 de 1

El carbón producido se almacena en el silo de almacenamiento TA-103 antes de pasar a la fase de impregnación. El carbón acumulado es llevado hacia el tanque agitado T-201 donde es impregnado con KOH grado técnico en fase acuosa. Esta mezcla es calentada hasta 92 °C para favorecer la impregnación del hidróxido en el carbón. Posteriormente el carbón húmedo es filtrado en los filtro de presión F-202 A/B y posterior pasa al secador S-203 para ser almacenado hasta el ingreso al proceso de activación. El agua separada del proceso de filtrado es almacenada en el tanque T-302 para luego ser usada en el proceso de lavado del carbón activado.

El carbón impregnado ingresa nuevamente al horno de pirólisis H-101, esta vez operando a una temperatura de 800 °C, y es activado durante un tiempo de 5 horas y nuevamente es enfriado en la cámara de enfriamiento IC-102. El horno de activación así mismo operará durante los 14 días restantes del mes, 24 horas al día hasta completar la producción de carbón activado establecida. El carbón activado se almacena en el silo de almacenamiento TA-301, para luego pasar al proceso de lavado en el tanque agitado T-302. Aquí el carbón es lavado con el agua almacenada en el tanque T-303 que se usó en el proceso de impregnación del KOH. Luego de ser lavado, pasa a los filtros de presión F-304 A/B donde se obtiene el carbón activado húmedo. Este carbón es secado en un secador S-305 antes de ingresar al molino de martillos M-306. En este molino se reduce el tamaño del carbón hasta un d_{80} de 75 μm que es la granulometría que establece la norma para carbones pulverizados.

3.4.4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DEL PROCESO

3.4.4.1. Horno rotatorio de carbonización

Las dimensiones determinadas del horno rotatorio de carbonización y activación se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Parámetros de diseño del horno rotatorio de carbonización y activación

PARÁMETRO DE DISEÑO	VALOR
Velocidad de giro	3 RPM
Fracción de llenado	8%
Ángulo de inclinación del horno	5°
Temperatura	800 °C
Tiempo de residencia	266,7 min
Díámetro	1,9 m
Longitud	27,9 m
Relación L/D	15

Para el diseño del horno de carbonización/activación se tomaron como datos de diseño el mayor flujo másico de entrada que procesará el horno que es el de la caña guadua recién corta que corresponde a un flujo de 468,72 kg/h. Además se consideró que la temperatura de operación del horno es de 800 °C que es la máxima temperatura a la que operará durante el proceso de activación del carbón impregnado. El combustible que se empleará para el funcionamiento del horno será el gas licuado de petróleo (GLP) que es el mismo que se usó en la prueba piloto realizada en el horno piloto monosolera Nichols Herreshoff.

Según De la Torre et al. (2005) los gases que se forman debido a la combustión incompleta del GLP en el interior de la cámara del horno Nichols son monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂) y agua en estado de vapor. (p. 53).

Estos gases son producto de la combustión incompleta del propano y butano, componentes mayoritarios del GLP. En base a las ecuaciones 3.1 y 3.2 se determinó el consumo mensual de GLP para el proceso de carbonización y el de activación, además del consumo de aire. Además también se calcula la composición de los gases de salida del horno producto de esta combustión incompleta.



En la Tabla 3.16 se observan los requerimientos energéticos para el funcionamiento del horno rotatorio. Se considera un consumo adicional de GLP dado que el horno operará la mitad del mes a una temperatura de 800 °C para el proceso de activación. Para el cálculo de este valor se consideró el calentamiento de los gases de combustión y la entalpía de reacción total que se consideró en las ecuaciones 1.8, 1.9 y 1.10 para que se lleve a cabo la activación del carbón usando KOH.

La composición de los gases de salida producto de la combustión incompleta del GLP se observa en la Tabla 3.17. Se observa que el nitrógeno es el gas que se encuentra en mayor proporción en los gases de salida, pero este no interviene dado que es un gas inerte. El gas que en mayor proporción está presente después del nitrógeno es el dióxido de carbono, que se forma de la combustión del propano y butano con el oxígeno que ingresa al horno. El gas que le sigue es el vapor de agua.

Tabla 3.16. Requerimiento energéticos para la operación del horno rotatorio de carbonización y activación

PARÁMETRO	VALOR
Flujo de GLP para 600 °C	6,96 t/mes
Flujo de GLP para 800 °C	2,94 t/mes
Flujo de GLP total	9,90 t/mes
Flujo de aire a condiciones normales (25 °C y 1 atm)	1 664,07 m ³ /mes
Factor Lambda (λ)	0,86

Dado que el horno opera en una atmósfera reductora ($\lambda=0,86$) se da una combustión incompleta del GLP y esto da lugar a la formación de gases de efecto invernadero como el hidrógeno (H_2) y el monóxido de carbono (CO).

Tabla 3.17. Composición en masa y moles de los gases de salida del horno rotatorio

COMPUESTO	Moles (mol/h)	Masa (kg/h)	% moles (%)	% masa (%)
CO	209,60	5,85	3,88	3,89
CO ₂	588,86	25,91	10,95	17,23
H ₂	209,06	3,77	3,88	2,50
H ₂ O	751,42	13,52	13,97	8,99
N ₂	3 617,94	101,3	67,29	67,37
Total	5 376,34	150,35	100,00	100,00

Si bien la composición de hidrógeno y monóxido de carbono no es muy alta, es necesario el dimensionamiento de una cámara de postcombustión de estos gases para así evitar su emanación hacia la atmósfera ya que son considerados como gases de efecto invernadero. El diseño de esta cámara permitirá que estos dos componentes se oxiden para producir dióxido de carbono y vapor de agua que ya no son considerados como gases de efecto invernadero.

3.4.4.2. Dimensionamiento de la cámara de postcombustión de gases

Debido a que el horno rotatorio opera en atmósfera reductora el GLP usado combustiona incompletamente formando gases de efecto invernadero como el monóxido de carbono y el hidrógeno. Para evitar la emanación de estos gases hacia la atmósfera se dimensionó una cámara de postcombustión para oxidar estos gases. Esta oxidación se da por medio de las reacciones 3.3 y 3.4.



Además también se dimensionó un lavador de gases para reducir su temperatura y de esta forma evitar contaminación térmica por la emanación de estos gases hacia la atmósfera. En las Tablas 3.18. y 3.19. se observan las características de los equipos dimensionados.

Tabla 3.18. Parámetro de diseño de la cámara de post combustión

Parámetro	Valor
Modelo	CPH
GLP	1,04 kg/h
Flujo de aire	15,90 kg/h
Tiempo de residencia	2 s

Tabla 3.19. Parámetro de diseño del lavador de gases

Parámetro	Valor
Temperatura de entrada de los gases	559,8 °C
Temperatura de salida de los gases	100,0 °C
Temperatura del agua de entrada	25,0 °C
Temperatura del agua de salida	90,0 °C
Flujo de agua	591,8 kg/h

Como se observa en la Tabla 3.18. se usa una cantidad extra de GLP y de aire para lograr una combustión completa del monóxido de carbono y del hidrógeno presente en los gases de salida del horno rotatorio. Esta combustión tiene como principal objetivo la formación de dióxido de carbono y vapor de agua que se juntan a la salida del resto de gases producto de la primera combustión que se da lugar durante la pirolisis al interior del horno. Por esta razón la composición de los gases de salida que se emanan por la chimenea cambia de la composición de los gases de salida del horno luego de atravesar la cámara de postcombustión que se presentó en la Tabla 3.17. La nueva composición de los gases de salida se presenta en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Composición de los gases de salida del proceso

Compuesto	Flujo molar (mol/h)	Flujo másico (kg/h)	% moles (%)	% masa (%)
CO ₂	639,02	28,11	11,48	17,84
H ₂ O	855,92	15,40	15,37	9,77
N ₂	4 051,68	113,40	72,79	71,98
O ₂	19,22	0,62	0,34	0,39
Total	5565,84	157,52	100,00	100,00

3.4.4.3. Dimensionamiento de la cámara de enfriamiento del carbón.

La cámara de enfriamiento del carbón producido tiene la función de reducir la temperatura del carbón que sale del horno rotatorio para evitar que este combustione con el oxígeno presente en el aire a la salida del horno y de esta manera evitar pérdidas de masa debido a esta oxidación. Esta cámara de enfriamiento ha sido diseñada como un intercambiador de calor concéntrico de tal forma que circule por la parte exterior el agua que es usada en el proceso de lavado e impregnación, y por la parte interna circula el carbón que sale del horno rotatorio.

El agua que circula por la parte externa del intercambiador, como ya se mencionó, es el agua usada en el proceso de impregnación. Posteriormente esta misma agua es usada en el proceso de lavado del carbón y es almacenada en el tanque T-303. El diseño del intercambiador permite que el agua salga a los 92 °C que se requiere en el proceso de impregnación. Así se aprovecha el calor que posee el carbón a la salida del horno rotatorio y este es trasladado al proceso de impregnación que se da en el tanque T-201 estableciendo así un proceso de recuperación de energía.

Para el diseño se usó las máximas condiciones a las que trabajaría el intercambiador que son la temperatura de 800 °C a la que sale el carbón activado

del horno rotatorio y un flujo máximo de carbón de 119,57 kg/h que se tiene cuando se carboniza la caña guadua.

En la Tabla 3.21. se observan las características de la cámara de enfriamiento del carbón a la salida del horno que fue dimensionada. Se detallan las dimensiones obtenidas del intercambiador.

Tabla 3.21. Parámetros de diseño de la cámara de enfriamiento de carbón

Parámetro	Valor
Temperatura máxima de entrada del carbón	800 °C
Temperatura de salida del carbón	40 °C
Flujo de máximo de carbón	119,57 kg/h
Temperatura de entrada del agua	25 °C
Temperatura de salida del agua	92 °C
Flujo de agua	0,14 m ³ /h
Longitud	4,00 m
Diámetro tubo interno	0,83 m
Diámetro del tubo externo	1,27 m

3.4.4.4. Dimensionamiento de los tanques usados en el proceso

El proceso consta de 5 tanques: los tanques TA-103 y TA-301 que almacenarán material sólido, y los tanques T-201, T-302 y T-303 que almacenarán soluciones acuosas.

El dimensionamiento de los tanques se hizo en función del volumen o de la masa a procesar. Las dimensiones de los tanques de sólidos TA-103 y TA-301 son iguales con una capacidad de almacenamiento de 5 toneladas. De igual forma los tanques de almacenamiento para líquidos T-201 y T-302 tienen una capacidad de

10 m³ cada uno. Solo el tanque de almacenamiento de agua T-303 tiene una capacidad de 15 m³.

Las dimensiones de los tanques que forman parte del proceso se presentan en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Parámetros de diseño de los tanques de almacenamiento

Nomenclatura del tanque	Diámetro (m)	Altura (m)	Capacidad (m ³)
Tanques de sólidos TA-103 TA-301	2,00	2,00	5,8
Tanques de impregnación y lavado T-201 T-302	2,25	2,00	10,0
Tanque de almacenamiento de agua T-303	2,50	3,00	15,0

3.4.4.5. Dimensionamiento de los secadores de carbón impregnado y carbón activado

Se usará el calor que poseen los gases de combustión producidos a la salida del horno rotatorio para aprovechar esta corriente gaseosa y secar el carbón impregnado de hidróxido de potasio que sale de los filtros F-202A/B y del carbón activado lavado que sale de los filtros F-304A/B. Este proceso de secado se lo realizará en los secadores S-203 y S-305 y de esta forma se busca aprovechar el calor que poseen los gases de salida del horno.

Además con esta acción también se reduce la temperatura de salida de estos gases que se emanan hacia la atmósfera. En la Tabla 3.23. se observa los parámetros de diseño de los secadores S-203 y S-305.

Tabla 3.23. Parámetros de diseño de los secadores S-203 y S-305

PARÁMETRO	VALOR
Temperatura máxima de entrada de gases	800 °C
Temperatura de salida de gases	559,8 °C
Agua Evaporada	119,6 kg/h

3.4.4.6. Dimensionamiento de los filtros de presión para el carbón húmedo

Se usarán filtros de presión de placas verticales de operación continua para separar al carbón impregnado usando los filtros F-202A/B y para filtrar los carbones activados a través de los filtros F-304A/B. En la Tabla 3.24. se observan las dimensiones determinadas de los filtros que se usará en los procesos mencionados.

Tabla 3.24. Parámetros de diseño de los filtros de carbón impregnado y activado.

PARÁMETRO	VALOR
Volumen de torta filtrada	139 dm ³
Volumen del tanque	1,04 m ³
Altura	2,80 m
Numero de placas	11

Se usarán filtros proporcionados por la empresa TEFSA S.A. De acuerdo a los cálculos de dimensionamiento del filtro se requerirá el filtro FV-900. Se usarán dos filtros en paralelo en los dos procesos de filtrado de los que consta la planta. Esto para que la operación de la planta no se vea interrumpida mientras se recupera el carbón filtrado de uno de los filtros o si alguno de los filtros entra en reparación o mantenimiento.

3.4.4.7. Dimensionamiento del sistema de reducción de tamaño del carbón activado

El último proceso, antes del empaquetado del producto, es la reducción de tamaño del carbón activado. Luego de ser secado, el carbón debe ser homogenizado a un tamaño de partícula menor a los 75 μm , valor que exige la norma INEN 1991 para la comercialización de carbones activados pulverizados (INEN, 1995, p. 3). Se usará un molino de martillos marca BUHLER que reducirá el carbón activado desde un tamaño inicial que va de 0,5 a 1,0 cm hasta los 75 μm que establece la norma. Además el molino seleccionado posee un tamiz acoplado con la malla necesaria. En la Tabla 3.25. se observan las características del molino seleccionado.

Tabla 3.25. Parámetros de diseño del molino de martillos para reducción de tamaño del carbón activado.

Parámetro	Valor
Flujo a procesar	107,03 kg/h
Capacidad del equipo	145,80 kg/h
Numero de martillos	24 largos 24 cortos
Potencia del equipo	126 kW

De igual forma se posee 2 molinos que trabajan en paralelo para así evitar interrupciones en el proceso si alguno de los equipos entra en mantenimiento o reparación. El catálogo del molino seleccionado se encuentra a detalle en el Anexo IX. Una vez determinadas todas las dimensiones se pudo establecer la distribución de los equipos en la planta. En la Figura 3.26. se observa un diagrama de distribución en planta o lay-out de cómo se estableció el ordenamiento de los equipos en el espacio donde se instalará la planta.

3.4.5. EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA

Se realizó un estudio de prefactibilidad económica para analizar la rentabilidad de instalar una industria que produzca carbón activado a partir de la caña guadua

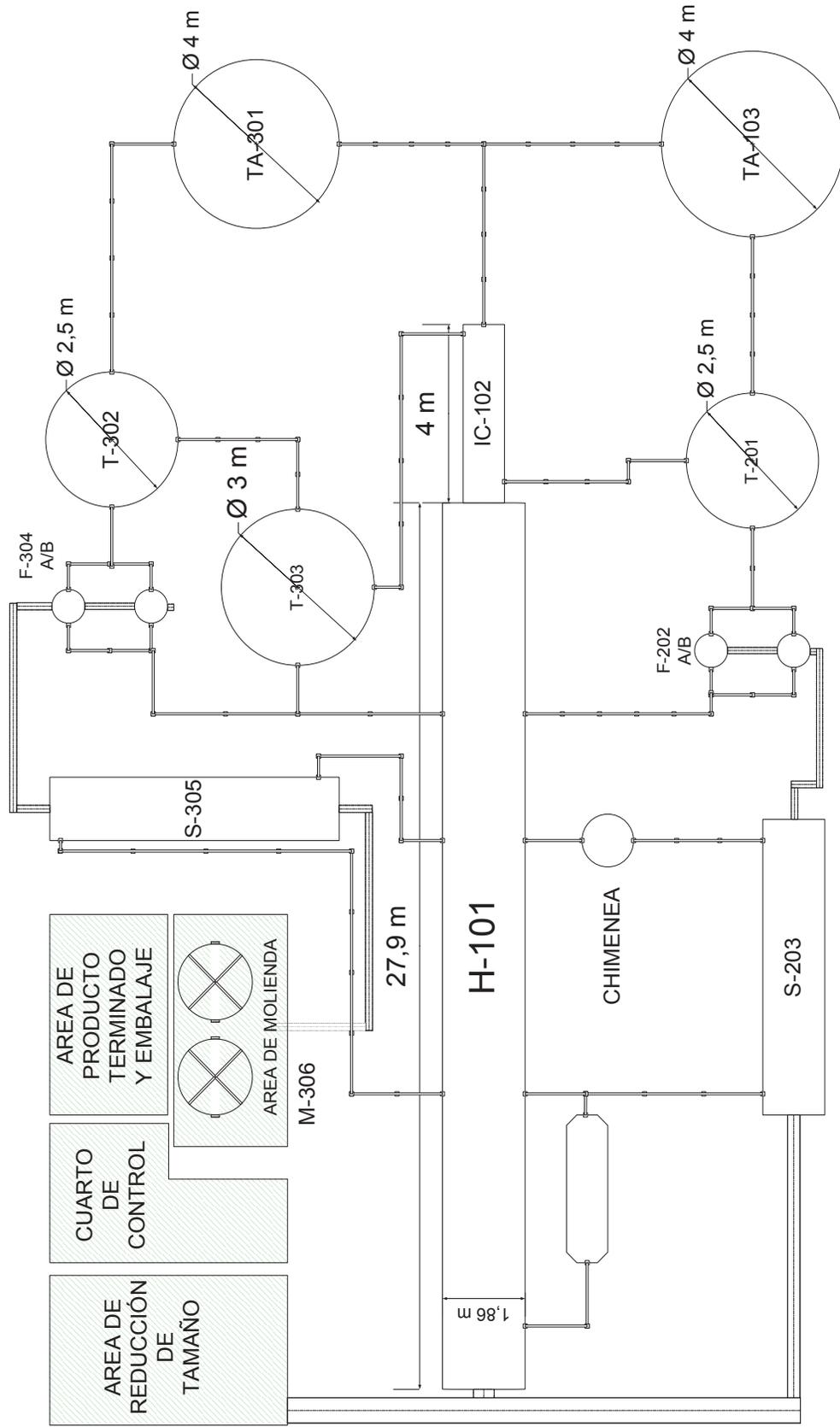


Figura 3.26. Diagrama Lay-out Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua

mediante activación química con KOH. Todos los cálculos de esta sección se detallan en el Anexo VIII.

Los parámetros para evaluar la factibilidad del proyecto se presentan en la Tabla 3.26. Como se observa, se tendrá un aporte de los socios interesados en la instalación del proyecto que tendrá un valor de 50 000 USD. Además un préstamo bancario con un 10% de interés mensual a 10 años completará la inversión necesaria para la instalación completa de la planta. Este préstamo bancario se estimó que será de un valor de 119 337,50 USD y representa la mayor contribución para la instalación de este proyecto. Con este financiamiento se realizó un flujo de caja con un horizonte del proyecto de 10 años.

Toda esta inversión también contempla un capital de operación que cubre 1 mes de operación de la planta sin percibir ningún ingreso, esto con el fin de garantizar el arranque de la planta hasta que empiece la producción. Tomando en cuenta el costo que tendrá la adquisición de los terrenos, a construcción e instalación de equipos y oficinas se determinó la inversión inicial que requerirá el proyecto.

Tabla 3.26. Parámetros de evaluación económica del proyecto “Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química usando KOH”

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Aportación de socios	USD	\$50 000,00
Aporte Patronal al IESS	% de valor sueldo	12,15
Duración de capital de operación	Mes	1
Interés bancario por anualidad	%	10
Amortización de edificios	Años	10
Amortización de maquinaria	Años	5
Amortización de muebles	Años	5
Amortización de otros activos	Años	10

En esta determinación también se consideró montos por la instalación de todo el inmobiliario de oficina, instalación de tuberías e instrumentación de los que equipos. Toda la inversión inicial se detalla en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27. Montos de inversión inicial del proyecto

DENOMINACIÓN	VALOR (USD)	PORCENTAJE (%)
Terreno y construcciones	65 000,00	38,38
Maquinaria y equipo	57 500,00	33,96
Instalación de maquinaria y equipos	17 250,00	10,19
Instrumentación	2 500,00	1,48
Tuberías y accesorios	2 000,00	1,18
Equipo y muebles de oficina	3 000,00	1,77
Capital de operación	22 087,50	13,04
TOTAL INVERSIONES	169 337,50	100,00

Como se observa alrededor del 80% de la inversión inicial del proyecto consiste en la adquisición de terrenos, equipos, construcción y montaje de la planta de producción. En el capital de operación se considera el pago de sueldos de la nomina que trabajará el primer mes que se estima arrancará la planta además del pago de los servicios industriales, adquisición de materia prima y de insumos además que no se percibirá ningún ingreso financiero como venta de producto terminado. La nomina que se contratará en la planta se observa en la Tabla 3.28.

Tabla 3.28. Nomina de personal operativo y administrativo

PERSONAL	FUNCIÓN	NUMERO DE EMPLEADOS	SUELDO (USD)
Personal Operativo	Operador de planta	12	950,00
	Técnico	2	750,00
Personal Administrativo	Gerente	1	2 000,00
	Ingeniero	1	1 500,00
	Secretaria	1	900,00

Se trabajará con 12 operadores de planta distribuidos en grupos de 3 para completar los 2 turnos de 12 horas que se requiere para la operación de la planta de producción. Con base en los balances de masa y energía realizados se determinó cuál es el monto a pagar anualmente por concepto de materia prima (caña guadua) y por concepto de insumos y servicios industriales. Todos estos costos se detallan en la Tabla 3.29.

Tabla 3.29. Costos de producción por compra de materia prima, insumos y servicios industriales

MATERIA PRIMA/INSUMO	COSTO UNITARIO	CANTIDAD ANUAL	COSTO ANUAL (USD/año)
Caña guadua	0,63 USD/caña	2 697 600 kg	1 699 488,00
Hidróxido de potasio	52,64 USD/kg	23 940 kg	154 761,60
Agua	0,43 USD/m ³	21600 (m ³ /año)	9 288,00
Electricidad	0,09 USD/kW	231 480 (kW/año)	20 833,20
GLP	2,00 USD/kg	76 560 kg	153 120,00
		TOTAL	2 037 490,80

Como se observa en la Tabla 3.29. donde se presentan los principales costos de materias primas, insumos y servicios industriales, el mayor gasto anual representa la compra de la materia prima, donde se gastará 1 699 488 dólares al año. Este rubro es alto ya que se necesita una gran cantidad de caña guadua debido a su bajo contenido de carbón fijo y gran cantidad de material volátil. Por esta razón para producir las 10t/mes de carbón de caña guadua se requiere de 45 t/mes de caña guadua. Otro gasto representativo es la compra de 23 940 kg de hidróxido de potasio grado técnico al año. Este gasto sin embargo solo se lo realizará cada 6 meses ya que el hidróxido de potasio es recuperado en el proceso de lavado del carbón activado y solo existen mínimas pérdidas de este reactivo durante el proceso.

Tomando en cuenta todos los costos de instalación de la planta, pago de nómina laboral y los costos de producción del carbón se estableció un flujo de caja del proyecto con un horizonte de 10 años y los parámetros mencionados en la Tabla

3.26. Los resultados de los indicadores económicos a evaluar obtenidos del flujo de caja se presentan en la Tabla 3.30.

Tabla 3.30. Indicadores económicos y precio de final del producto para la instalación de la planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua.

INDICADOR	VALOR
Tasa interna de Retorno (TIR)	16%
Valor actual Neto (VAN)	14 313,49 USD
Precio de venta por kilogramo de carbón activado	3,85 USD/kg

Debido a esto el precio de 3,85 USD/kg se considera un precio mínimo al que se debería vender el producto para que el proyecto sea sustentable y rentable. En la Figura 3.27. se observa la determinación del punto de equilibrio en una gráfica que relaciona las unidades de producto vendidas, en kilogramos, versus las ventas y los costos totales. Se plantea incrementos de 0,75 USD al año en el costo de la materia prima y además de 0,50 \$ al año en el costo de insumos.

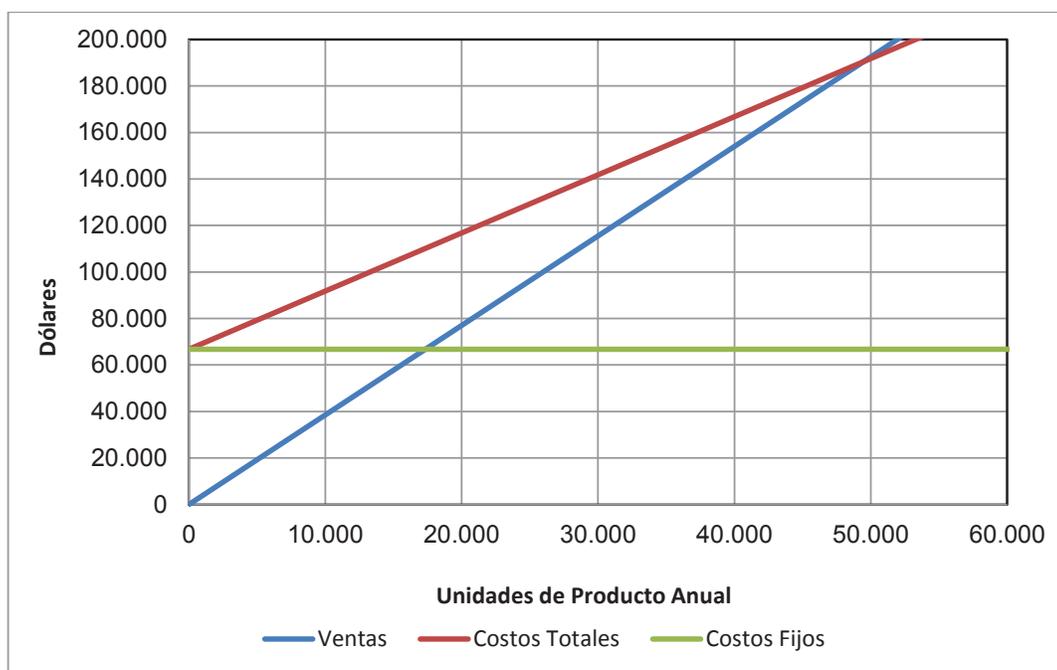


Figura 3.27. Punto de equilibrio del proyecto “Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química con KOH”

El valor actual neto del proyecto tiene un valor de 14 313,49 USD y la tasa interna de retorno tiene un valor del 16%. Estos valores corresponden fijando un precio de venta del producto de 3,85 USD/kg de carbón activado. Si se fija valores menores de venta del producto se obtiene cifras negativas del valor actual neto. El punto de equilibrio es la cantidad de producto terminado vendido donde se recupera la inversión y ya no se tiene pérdidas ni ganancias, es decir cualquier venta por encima de esta cantidad ya empieza a representar ganancias para la compañía. El punto de equilibrio determinado en el flujo de caja es de 49 466,39 kilogramos de producto vendido y la inversión inicial se empieza a recuperar a partir del sexto año de operación de la planta.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- La caña guadua es un material lignocelulósico de alto contenido de material volátil (81,63 %). Del total de la masa de la caña guadua, el 15,48 % es carbón fijo, el 2,89 % son cenizas y tiene una humedad del 9,36 %. Además, la caña guadua es una gramínea de rápido crecimiento y abundante en el país. Por estas razones se considera a la caña guadua como un material idóneo para producir carbón.
- Del análisis termogravimétrico realizado a una muestra de caña guadua a una velocidad de calentamiento de 10 K/min en atmósfera inerte se determinó que existen 4 zonas de degradación a medida que aumenta la temperatura. La primera zona de degradación que va desde la temperatura ambiente hasta los 140 °C no influye en el análisis y solo se considera una etapa de pre pirólisis. La región de bajas temperaturas fue identificada desde los 200 °C hasta los 280 °C. La región de media temperatura va desde los 280 °C hasta los 543 °C y la de altas temperaturas desde los 543 °C hasta los 744 °C.
- Luego de identificar las regiones de baja, media y alta temperatura se pudo determinar la composición química de la caña guadua a partir de la aplicación del método propuesto por Coats y Redfern para el cálculo de los parámetros cinéticos y luego el procedimiento usado por Kim et al. para determinar el porcentaje de los elementos mayoritarios de un material sólido durante su degradación térmica en atmósfera inerte. Usando estos métodos se determinó que la caña guadua está compuesta en un 31,18 % de lignina, 41,33 % de celulosa y un 21,03 % de hemicelulosa.
- Para la carbonización de la caña guadua se requiere de 600 °C de temperatura en atmósfera reductora ($\lambda=0,9$). A esta temperatura se obtiene

un material con un contenido de carbón fijo por encima del 70,00% a partir de 30 minutos de carbonización. A temperaturas menores, como a los 400 °C o 500 °C, el material obtenido solo presenta un contenido de carbón fijo de alrededor del 68,00% y un contenido de material volátil mayor al 20,00% incluso con tiempos de 2 horas de carbonización.

- Para la prueba a escala piloto en la carbonización de la caña guadua se analizó la influencia de la agitación al interior de la cámara del horno. La agitación al interior del horno produce un material con más alto contenido de carbón fijo (74,86 %) en comparación al ensayo donde no se usó agitación (70,24 %). Además esto se ve reflejado en el contenido de material volátil donde el carbón obtenido usando agitación tiene tan solo un 13,88 % de material volátil versus el carbón de lecho fijo que tiene un porcentaje del 18,45 %. El tiempo de carbonización se determinó que sea de 30 min.
- En las pruebas a escala laboratorio y piloto para la activación química del carbón de la caña guadua usando hidróxido de potasio se determinó que las mejores condiciones para activar el carbón fueron una temperatura de 800 °C, una relación g de KOG/ g C.C.G de 2 y un tiempo de 3 horas. A escala laboratorio, bajo estas condiciones, se obtuvo un índice de yodo de 761 mg de I₂/ g C.A. mientras que a escala piloto el índice de yodo más alto obtenido fue de 661 mg de I₂/ g C.A.
- El área BET del carbón activado producido a escala piloto mediante activación química con hidróxido de potasio fue de 503,42 m²/g y con un volumen de poro de 0,2324 cm³/g. En general, mediante la activación química se desarrolló microporosidad en el carbón de la caña guadua. Las pruebas de decoloración de jarabe de azúcar y el índice de azul de metileno no presentaron resultados apreciables, por lo que se descartó el desarrollo de macro y micro porosidad mediante este método de activación.
- Se identificaron grupos funcionales desarrollados en la superficie del carbón activado luego del proceso de activación. Los grupos funcionales

identificados fueron 2 grupos C-H entre los 670 a los 780 cm^{-1} , grupos R-C-R o grupo de ésteres simétricos a los 1050 cm^{-1} , grupos C-O correspondientes a xanteno o ésteres que se identificaron a los 1350 cm^{-1} y a los 1600 cm^{-1} nuevamente se identifican grupos C-O pero que corresponden a grupos carbonilos o quinonas.

- Para la implementación del proceso industrial de producción se diseñó un proceso que consta de 3 etapas. La primera una etapa de carbonización de la materia prima. La segunda etapa consiste en la impregnación del hidróxido de potasio en el carbón. La tercera etapa consta del proceso de activación del carbón y de la recuperación del hidróxido de potasio para su nuevo uso.
- El carbón producido será un carbón pulverizado con una granulometría menor a 75 μm y con un índice de yodo de 661 $\text{mg I}_2/\text{g C.A.}$ que son los requisitos que exige la norma ecuatoriana para la comercialización de carbones activados pulverizados.
- El horno rotatorio diseñado se empleará la primera mitad de cada mes como un horno de carbonización de caña guadua que operará a 600 $^{\circ}\text{C}$ hasta completar la cantidad suficiente de carbón para la producción establecida del mes. La otra mitad del mes el horno funcionará como un horno de activación a una temperatura de 800 $^{\circ}\text{C}$ para así activar el carbón impregnado. El horno además contará con un sistema de post combustión y de lavado de gases para así evitar contaminación por gases de efecto invernadero y contaminación térmica
- Se estableció un precio mínimo de venta del kilogramo de carbón activado de 3,85 USD. Con este precio, al realizar un análisis económico evaluando el proyecto durante un horizonte de 10 años se obtiene un valor actual neto (VAN) de 14 313,49 USD y una tasa interna de retorno del 16%. El tiempo de retorno de la inversión es de 5 años y el punto de equilibrio determinado fue de 49 466,39 kg de carbón.

4.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda analizar un método de molienda para la caña guadua. En la parte inicial de este estudio se tuvo algunos inconvenientes con la reducción de tamaño de la caña guadua. Una alternativa podría ser la crio molienda.
- Se puede realizar un estudio analizando ensayos termogravimétrico de muestras de caña guadua a diferentes velocidades de calentamiento. Al variar la velocidad de calentamiento la descomposición de los componentes mayoritario de la caña guadua (lignina, celulosa y hemicelulosa) difiere a las mostradas en este estudio.
- Analizar la influencia de la granulometría en la carbonización y activación de la caña guadua usando hidróxido de potasio. Es un estudio necesario para determinar esta condición adicional a este estudio. Además determinar las condiciones para activar químicamente los carbones de otras materias primas como el cuesco de coco o de palma africana.
- En el proceso de impregnación convendría analizar variables como la granulometría del carbón a impregnar y la influencia de la temperatura para así hacer más eficiente este proceso. Además analizar por medio de difracción de rayos X y un análisis elemental del carbón impregnado y del carbón activado sin lavar para analizar la presencia del hidróxido en la superficie del carbón.
- Se recomienda además realizar ensayos de activación física con vapor de agua y dióxido de carbono a la caña guadua y realizar una comparación con otros métodos de activación química como por ejemplo el uso de cloruro de zinc ($ZnCl_2$) o de ácido fosfórico (H_3PO_4).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Altawel, N. (2014). *The selection process of biomass materials for the production of bio-fuels and co-firing* (1^{ra} Ed.). New Jersey, USA: IEEE.
2. Bandosz, T. (2006). *Activated carbon. Surfaces in environmental remediation.* (1^{ra} Ed.). New York, USA: ELSEVIER.
3. Diseño e instalación de estructuras de Bambú. (2015), Bambú Guadua, Recuperado de: bambusa.es/bambu-características/bambú_guadua/ (Septiembre 2014)
4. Basu, P. (2013). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction. Practical design and theory* (2^{da} Ed.). San Diego, USA: Elsevier Science and Technology books.
5. Bonilla, O. (2011). *Transferencia de Calor I: Material auxiliar para la cátedra.* (1^{ra} Edición). Quito, Ecuador.
6. Capareda, S. (2013). *Introduction to biomass energy conversions* (1^{ra} Ed.). Boca Raton, USA: Taylor & Francis Group.
7. Chiluiza, C. Hernandez, J. (2009) *Elaboración de papel artesanal de caña guadua (Guadua Angustifolia K).* (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Agroindustrial). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
8. Choy, K. Barford, J. Mckay, G. (2005). Production of activated carbon from bamboo scaffolding waste-process design, evaluation and sensitivity analysis. *Chemical Engineering Journal*, volumen (109), 147-167.
9. Coca Cola Quality System. (2002). *Norma Interna. Prueba de campo para carbón activado*, 1-5.

10. Council for Mineral Technology. (1987). *Iodine number*. En Shipman, A. (Ed.). Testing of activated carbons, (pp. 31-38). Johannesburg, Sudáfrica: MINTEK
11. De la Torre, E. (2015). *Préparation de charbon actif à partir de coques de noix de palmier à huile pour la recuperation d'or et le traitement d'effluents cyanurés*. (Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences agronomiques et ingenierie biologique). Universidad católica de Lovaina, Louvain-La-Neuve, Bélgica.
12. De la Torre, E. Guevara, A. y Ríos, C. (2005). La tostación como pretratamiento de minerales auríferos refractarios: *Recuperación de oro a partir de minerales refractarios poli sulfurados*, Trujillo, Perú: Escuela Politécnica Nacional, 40-69.
13. Díaz-Terán, J. Nevskaja, D. Fierro, J. Lopez-Peinado, A. Jerez, A. (2003). Study of chemical activation process of a lignocellulosic material with KOH by XPS and XRD. *Microporous and mesoporous materials volumen*, (60), 173-181.
14. Duranoglu, D. Beker, U. (2013). Steam and KOH activated carbon from peach stones. *Energy Sources, Part A volumen* (34), 1004-1015.
15. European Council of Chemical Manufacturers' Federations. (1986). *Test Methods for Activated Carbon*. Recuperado de <http://www.cefic.org> (Enero 2014).
16. Gert, S. (2001). *Activated carbon for purification of alcohol* (1ra Edición). Malmoe, Suecia.
17. Ghavami, K. Marinho, A. (2004). Propiedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambú da espécie *Guadua angustifolia*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, volumen* (9), 107-114.

18. Gobierno de la Provincia de Pichincha (2011). *Estudio de ubicación de lugares y personas que poseen Caña Guadua y Bamboo Gigante en el noroccidente de la provincia de Pichincha*. Recuperado de <http://repositorio.espe.edu.ec> (Noviembre, 2013).
19. González, O. (2014). *Caracterización del bambú Guadua (Guadua Angustifolia) para el diseño e industrialización en España*. (Tesis de Maestría no publicada) Universidad de Almería, Almería, España.
20. González, P. y Pliego-Cuervo, Y. (2012). Physicochemical and microtextural characterization of activated carbons from water steam activation of three bamboo species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, volumen (99), 32-38.
21. González-García, P. Centeno, T. Urones-Garrote, E. Ávila-Brande, Otero-Díaz, L. (2012). Microstructure and surface properties of lignocellulosic-based activated carbons. *Applied Surface Science*, volumen (265), 731-736.
22. Hu, Z. Vansant, E (1995). Synthesis and characterization of a controlled-micropore-size carbonaceous adsorbent produced from walnut shell. *Microporous materials*, volumen (3), 603-612.
23. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1995a). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 989:94*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte1/1989.pdf> (enero, 2014).
24. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1995a). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 995:91*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte1/1995.pdf> (noviembre, 2014).

25. Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1995a). *Guía práctica Ecuatoriana GPE INEN 042:1976*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte1/1989.pdf> (enero, 2014).
26. Ioannidou, O. Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production – A review. *Renewable & sustainable energy reviews volume* (11), 1966-2005.
27. Jiang, Z. Lui, Z, Benhua, F. Zhiyong, C. Yan, Yu. Lui, X. (2012). The pyrolysis characteristics of moso bambu. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, volume* (94), 48-52.
28. Klass, D. (1998). *Biomass for renewable energy. Fuels and Chemicals* (1^{ra} Ed.). San Diego, California: Academic Press.
29. Kuhad, R.C. Singh, A. (2007). *Lignocellulose Biotechnology. Future Prospects* (1^{ra} Ed.). Nueva Delhi, India: IK International.
30. León, A. Castro, J. Arguello O. Rincón J. (1989). Evaluación del cuesco de palma y del carbón El Cerrojón para producir carbón activado. *Revista colombiana de química volumen* (18). 67-89.
31. Li, X. (2004). *Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing*. (Tesis de maestría no publicada). Beijing Forestry University, Beijing, China.
32. Londoño, X. Camayo, G. Riaño, N. y Lopez Y. (2002) Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *Bamboo science and culture. The Journal of the American Bamboo Society volume* (16), 18-31.
33. Marsh, H. y Rodriguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon* (1^{ra} Ed.). Alicante, España: Elsevier Science & Technology books.

34. Moscoso, F. (2013) *Diseño de una planta de producción de carbón activado mediante activación física a partir del cuesco de coco (Cocos nucifera L.)* (Proyecto de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
35. Mui, E. Cheung, W, Lee, V. McKay, G. (2010). Compensation effect during the pyrolysis of tyres and bamboo. *Waste management volumen* (30), 821-830.
36. Muniandi, L. Adam, F. Mohamed, A, NG, E. (2014). The synthesis and characterization of high purity mixed microporous/mesoporous activated carbon from rice husk using chemical activation with NaOH and KOH. *Microporous and mesoporous materials volumen* (197), 316-323.
37. Nachenius, R. Ronsse, F. Venderbosch R. y Prins, W. (2013). Biomass Pyrolysis. *Advances in Chemical Engineering*, Edición 42, 7-139.
38. Nakawana, Y. Molina-Sabio, M. Rodriguez-Reinoso, F. (2007). Modification of the porous structure along the preparation of activated carbon monoliths with H_3PO_4 and $ZnCl_2$. *Microporous and mesoporous materials, volumen* (103), 29-34.
39. Órfão, J. Antunes, F. Figueiredo, J. (1998). Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials - three independent reactions model. *Fuel, volumen* (78), 349-358.
40. Oyedum, A. Gebreegziabher, T. y Hui, C. (2012). Mechanism and modeling of bamboo pyrolysis. *Fuel processing technology, volumen* (106), 595-604.
41. Páez, M. (2013). *Manual para el estudiante de diseño de plantas industriales* (1ra. Ed.). Quito Ecuador.

42. Park, W. (2008). *A study of pyrolysis of charring materials and its application to fire safety and biomass utilization*. (Disertación doctoral). Universidad de Michigan, EE.UU.
43. Perry, J. (2014). *Manual del ingeniero químico Tomo II*. México: McGraw- Hill Book Company.
44. Prauchner, M. J., & Rodríguez-Reinoso, F. (2012). Chemical versus physical activation of coconut shell: A comparative study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 152, 163–171. doi:10.1016/j.micromeso.2011.11.040
45. Skoog, D. Holler, J. Nieman, T. (2014) *Principios de Análisis Instrumental*. (5ta. Ed.). Madrid España.
46. Song, M. Baosheng, J. Rui, X, Li, Y. Yimin, W. Zhaoping, Z. Huang, Y. (2012). The comparison of two activation techniques to prepare activated carbon from corn cob. *Biomass & Bioenergy*, volumen (48), 250-256.
47. Sütçü, H. Demiral, H. (2009). Production of granular activated carbons from loquats stones by chemical activation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, volume (84), 47-52.
48. Wu, M. Qingfang, Z. Jieshan Q. Yansheng, G. Shang, H. Aijun, Y. (2004). Preparation and characterization of porous carbons from PAN-based preoxidized cloth by KOH activation. *Carbon volumen* (42), 205-210.
49. Yang, H. Yan, R. Chen, H. Lee, D. Zheng, C. (2006). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, *Fuel volumen* (86), 1781-1787.

ANEXOS

ANEXO I
CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA CAÑA GUADUA: MÉTODOS
EMPLEADOS Y EJEMPLO DE CÁLCULO

Ficha Técnica # I.1

Tipo de Muestra: Caña Guadua

Tipo de Ensayo: Determinación de humedad

Objetivo: Determinar la humedad promedio de la caña guadua

Tabla Al.1. Datos experimentales obtenidos en la determinación de humedad de la caña guadua.

	Masa inicial	Masa final	% Humedad
M1	1,004	0,908	9,56
M2	1,095	0,995	9,13
M3	1,013	0,911	10,06
M4	1,027	0,938	8,66
		Promedio	9,35

Ejemplo de cálculo:

Para la M3

M_i= 1,013 g

M_f=0,911 g

$$\%H = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 = \frac{1,013 - 0,911}{1,013} \times 100 = 10,069\%$$

Ficha Técnica # I.2

Tipo de Muestra: Caña Guadua

Tipo de Ensayo: Determinación de contenido de material volátil, carbón fijo y cenizas

Objetivo: Determinar el contenido de material volátil, carbón fijo y cenizas de 4 muestras de caña guadua

Tabla AI.2. Resultados de la determinación de material volátil, carbón fijo y cenizas de 4 muestras de aserrín de caña guadua

Ensayo	1	2	3	4
Peso Crisol	23,0848	23,0416	23,8768	21,4984
Peso Muestra	1,0054	1,0071	1,0004	1,0007
Peso 7 min	23,2423	23,2513	24,0726	21,6727
Peso 2 horas	23,1077	23,0942	23,8976	21,5182
% Volátiles	84,33	79,18	80,43	82,58
% Carbón fijo	13,39	15,60	17,49	15,44
% Cenizas	2,28	5,22	2,08	1,98

Tabla AI.3. Valores promedio obtenidos de porcentaje de material volátil, carbón fijo y cenizas de 4 muestras de aserrín de caña guadua

	% Volátiles	% Carbón fijo	% Cenizas
Promedio	81,63	15,48	2,89

Ejemplo de cálculo:

Para el ensayo 3

$$M_{7m}=24,0726 \text{ g}$$

$$M_c=23,8768 \text{ g}$$

$$M_m=1,0004 \text{ g}$$

$$\% \text{volátiles} = \left[1 - \left(\frac{M_{7m} - M_c}{M_m} \right) \right] \times 100 = \left[1 - \left(\frac{24,0726 - 23,8768}{1,0004} \right) \right] \times 100 = 80,43\%$$

$$M_{7m}=24,0726 \text{ g}$$

$$M_{2h}=23,8976 \text{ g}$$

$$M_m=1,0004 \text{ g}$$

$$\% \text{carbón fijo} = \frac{M_{7m} - M_{2h}}{M_m} \times 100 = \frac{24,0726 - 23,8976}{1,0004} \times 100 = 17,49\%$$

$$\% \text{volátiles} = 80,43\%$$

$$\% \text{carbón fijo} = 17,49\%$$

$$\% \text{cenizas} = 100 - \% \text{material volátil} - \% \text{carbón fijo} = 100 - 80,43\% - 17,49\% = 2,08\%$$

Ficha Técnica # I.3

Tipo de Muestra: Caña Guadua

Tipo de Ensayo: Determinación de densidad aparente y real de la caña guadua

Objetivo: Determinar la densidad real y aparente de una muestra de caña guadua

Tabla AI.4. Resultados de la determinación de la densidad aparente en una muestra de aserrín de caña guadua

Parámetro	Peso (g)
M_{P+M}	103,17
M_P	27,95
Densidad aparente	0,7522

Tabla AI.5. Resultados de la determinación de la densidad real en una muestra de aserrín de caña guadua

Parámetro	Peso (g)
M_v	11,1261
M_{v+m}	12,1261
M_{v+m+a}	38,1081
M_{v+a}	41,8052
Densidad real	0,8614

Ejemplo de cálculo:

$$M_{P+M} = 103,17 \text{ g}$$

$$M_P = 27,95 \text{ g}$$

$$\rho_{aparente} = \frac{M_{P+M} - M_P}{100} = \frac{103,17 - 27,95}{100} = 0,86 \text{ g/cm}^3$$

$$M_v = 11,1261 \text{ g}$$

$$M_{v+m} = 12,1261 \text{ g}$$

$$M_{v+m+a} = 38,1081 \text{ g}$$

$$M_{v+a} = 41,8052 \text{ g}$$

$$\rho_{real} = \frac{1}{1 + \left(\frac{M_{v+a} - M_{v+m+a}}{M_{v+m} + M_v} \right)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{41,8052 - 38,1081}{12,1261 + 11,1261} \right)} = 0,8614 \text{ g/cm}^3$$

Ficha Técnica # I.4

Tipo de Muestra: Caña Guadua

Tipo de Ensayo: Determinación de ángulo de reposo

Objetivo: Determinar el ángulo de reposo de una muestra de caña guadua

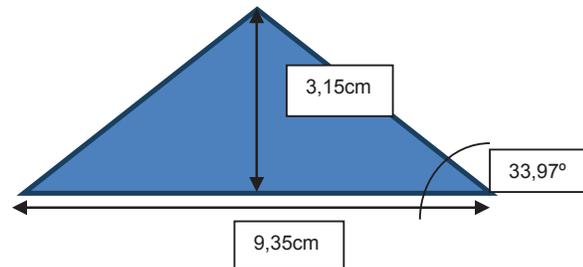


Figura AI.1. Esquema para la determinación del ángulo de reposo de la caña guadua

Ejemplo de cálculo:

$$\tan \alpha = \frac{\text{Cat. Opuesto}}{\text{Cat. Adyacente}} = \frac{3,15}{9,35/2} \rightarrow \tan^{-1}(0,67) = 33,97^{\circ}$$

ANEXO II
CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA CAÑA GUADUA:
MÉTODOS EMPLEADOS Y EJEMPLO DE CÁLCULO

Ficha Técnica # II.1

Tipo de Muestra: Caña Guadua

Tipo de Ensayo: Análisis termogravimétrico

Objetivo: Obtener a curva TGA y DTGA para una muestra pulverizada representativa de la caña guadua.

A continuación se presentan los datos obtenidos del análisis termogravimétrico realizado a una muestra pulverizada representativa de la caña guadua con una tasa de calentamiento de 10 °C/min y un flujo de nitrógeno de 25 mL/min.

Tabla AII.1 Datos de la curva TGA obtenidas del análisis termogravimétrico de la cañaguadua con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	TGA mg	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	TGA mg
0	22,33	6,419	770	140,7	6,049
60	24,06	6,416	1058	189,2	6,023
120	30,45	6,412	1080	192,5	6,02
180	41,62	6,369	1140	202,5	6,006
240	51,23	6,296	1260	223	5,949
300	61,51	6,225	1320	233	5,889
360	71,63	6,169	1380	243,1	5,805
420	81,85	6,126	1440	253	5,692
480	91,98	6,097	1500	263,1	5,54
540	102,1	6,079	1560	273,2	5,337
600	112,2	6,067	1620	283,2	5,063
660	122,3	6,057	1680	293,2	4,709
720	132,3	6,052	1740	303,2	4,292

Tabla AII.1 Datos de la curva TGA obtenidas del análisis termogravimétrico de la caña guadua con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min (**continuación...**)

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	TGA mg	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	TGA mg
1800	313,2	3,873	4260	723,9	1,916
1860	323,2	3,503	4320	734	1,902
1920	333,3	3,215	4326	734,9	1,9
1980	343,2	3,023	4330	735,6	1,9
2040	353,2	2,919	4380	744	1,887
2100	363,3	2,86	4440	754,2	1,866
2112	365,3	2,848	4500	764,2	1,845
2112	365,3	2,848	4560	774,1	1,827
2220	383,3	2,748	4620	784,6	1,806
2340	403,3	2,648	4680	794,4	1,792
2460	423,3	2,552	4740	804,3	1,776
2698	463,1	2,385	4800	814	1,76
2700	463,4	2,382	4860	824,1	1,744
2820	483,4	2,311	4920	834,1	1,728
2940	503,4	2,253	4980	844,2	1,716
3060	523,4	2,196	5040	854,2	1,705
3180	543,4	2,151	5100	864,3	1,696
3300	563,4	2,112	5160	874,2	1,69
3420	583,2	2,081	5220	884,3	1,683
3540	603,2	2,051	5280	894,3	1,679
3660	623,3	2,027	5340	904,2	1,675
3780	643,4	2,007	5400	914,2	1,674
3900	663,5	1,989	5460	924,3	1,673
4020	683,6	1,967	5482	928	1,672
4140	703,8	1,943			

Para obtener la curva DTGA se debe graficar la variación del peso de la muestra de caña guadua en función de la variación del tiempo en el transcurrir el ensayo.

Un ejemplo de cálculo para la determinación de estos valores se presenta a continuación:

Variación de peso entre los 60 s y los 120 s:

A t=60 s= 1 min, W= 6,416 mg

A t=120 s = 2 min, W= 6,412 mg

$$\frac{dW}{dt} = \frac{6,416 - 6,412}{2 - 1} = \frac{-0,04}{1}$$

$$\frac{dW}{dt} = -0,04 \left[\frac{mg}{m} \right]$$

Se procede igual para todos los resultados de la Tabla AII.1. Los resultados para la determinación de la curva DTGA se presentan en la Tabla AII.2.

Tabla AII.2 Datos de la curva DTGA obtenidas del análisis termogravimétrico de la caña guadua

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	TGA (mg)	DTGA (mg/min)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	TGA (mg)	DTGA (mg/min)
0	22,33	6,419	0,021	15	162,7	6,042	-0,005
1	24,06	6,416	-0,004	16	172,7	6,037	-0,008
2	30,45	6,412	-0,043	17	182,8	6,029	-0,009
3	41,62	6,369	-0,073	18	192,5	6,02	-0,014
4	51,23	6,296	-0,071	19	202,5	6,006	-0,021
5	61,51	6,225	-0,056	20	213,1	5,985	-0,036
6	71,63	6,169	-0,043	21	223	5,949	-0,06
7	81,85	6,126	-0,029	22	233	5,889	-0,084
8	91,98	6,097	-0,018	23	243,1	5,805	-0,113
9	102,1	6,079	-0,012	24	253	5,692	-0,152
10	112,2	6,067	-0,01	25	263,1	5,54	-0,203
11	122,3	6,057	-0,005	26	273,2	5,337	-0,274
12	132,3	6,052	-0,004	27	283,2	5,063	-0,354
13	142,4	6,048	-0,002	28	293,2	4,709	-0,417
14	152,5	6,046	-0,004	29	303,2	4,292	-0,419

Tabla AII.2 Datos de la curva DTGA obtenidas del análisis termogravimétrico de la caña guadua
(continuación...)

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	TGA (mg)	DTGA (mg/min)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	TGA (mg)	DTGA (mg/min)
30	313,2	3,873	-0,37	59	603,2	2,051	-0,012
31	323,2	3,503	-0,288	60	613,3	2,039	-0,012
32	333,3	3,215	-0,192	61	623,3	2,027	-0,013
33	343,2	616,2	3,023	62	633,3	2,014	-0,007
34	353,2	2,919	-0,059	63	643,4	2,007	-0,009
35	363,3	2,86	-0,057	64	653,4	1,998	-0,009
36	373,3	2,803	-0,055	65	663,5	1,989	-0,01
37	383,3	2,748	-0,06	66	673,6	1,979	-0,012
38	393,3	2,688	-0,04	67	683,6	1,967	-0,012
39	403,3	2,648	-0,049	68	693,7	1,955	-0,012
40	413,3	2,599	-0,047	69	703,8	1,943	-0,013
41	423,3	2,552	-0,047	70	713,9	1,93	-0,014
42	433,4	2,505	-0,04	71	723,9	1,916	-0,014
43	443,3	2,465	-0,043	72	734	1,902	-0,015
44	453,4	2,422	-0,04	73	744	1,887	-0,021
45	463,4	2,382	-0,037	74	754,2	1,866	-0,021
46	473,2	2,345	-0,034	75	764,2	1,845	-0,018
47	483,4	2,311	-0,027	76	774,1	1,827	-0,021
48	493,4	2,284	-0,031	77	784,6	1,806	-0,014
49	503,4	2,253	-0,029	78	794,4	1,792	-0,016
50	513,4	2,224	-0,028	79	804,3	1,776	-0,016
51	523,4	2,196	-0,021	80	814	1,76	-0,016
52	533,3	2,175	-0,024	81	824,1	1,744	-0,016
53	543,4	2,151	-0,021	82	834,1	1,728	-0,012
54	553,4	2,13	-0,018	83	844,2	1,716	-0,011
55	563,4	2,112	-0,018	84	854,2	1,705	-0,009
56	573,4	2,094	-0,013	85	864,3	1,696	-0,006
57	583,2	2,081	-0,016	86	874,2	1,69	-0,007
58	593,2	2,065	-0,014	87	884,3	1,683	-0,004

Tabla AII.2 Datos de la curva DTGA obtenidas del análisis termogravimétrico de la caña guadua (continuación...)

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	TGA (mg)	DTGA (mg/min)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	TGA (mg)	DTGA (mg/min)
88	894,3	1,679	-0,004	96	950,1	1,678	0,004
89	904,2	1,675	-0,002	97	950,2	1,682	0,006
90	914,2	1,673	-0,001	98	950,3	1,688	0,003
91	924,3	1,672	0,001	99	950,4	1,691	0,003
92	934,3	1,673	-0,001	100	950,3	1,694	0,002
93	944,4	1,672	0,001	101	950,4	1,696	0,002
94	949,8	1,673	0,001	102	950,2	1,698	-1,698
95	950	1,674	0,004				

Para el cálculo de la composición química de la caña guadua se siguió el método de Coats-Redfern para la determinación de los parámetros cinéticos. En este método se gráfica $\ln\left[\frac{AR}{\beta E_a}\left(1 - \frac{2RT}{E_a}\right)\right]$ vs $\frac{1}{T}$. Antes de realizar la linealización, se debe determinar en cual rango se descompone cada uno de los componentes de la caña guadua. Por ejemplo, para la descomposición en la zona de altas temperaturas, donde se asume que solo se descompone la lignina, se obtuvo la gráfica que se observa en la Figura AII.1.

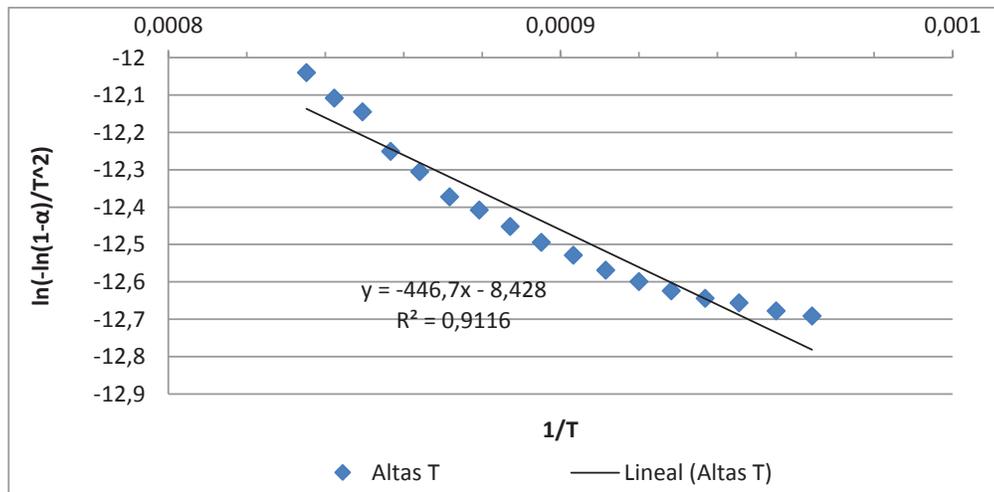


Figura AII.1. Linealización de la zona de altas temperaturas para la obtención de los parámetros cinéticos de la lignina.

A partir de la pendiente de la recta obtenida y de la intersección con el eje Y se obtiene los parámetros cinéticos necesarios para aplicar la ecuación 1.5 y determinar así la masa inicial y la composición que tiene en la caña guadua, del polímero que se degrada en la zona de altas temperaturas, en este caso la lignina.

$$W_1 = W_{1,0} \cdot \exp \left\{ -\frac{A_1 RT^2}{\beta E_1} \left[1 - \frac{2RT}{E_1} + 4 \left(\frac{RT}{E_1} \right)^2 \right] \exp \left(-\frac{E_1}{RT} \right) \right\}$$

$$W_1 = (6,419 - 1,698) \cdot \exp \{ -0,025601 [1 - (-266) + 70801,1] \exp(-7,77^{-6}) \}$$

$$W_1 = 2,0014 \text{ g}$$

Una vez determinado el peso inicial del polímero, se calcula la velocidad de degradación del componente usando la ecuación 1.2. Así esta variación obtenida es restada de la velocidad de degradación total de la caña guadua. Una vez calculados los parámetros cinéticos del primer componente, se procede de la misma forma para el segundo componente, en la región de medias temperaturas. Para la región de medias temperaturas, se asume que el componente que se descompone es la celulosa. En la Tabla AII.2 se observa la linealización de la curva TGA correspondiente a la zona de medias temperaturas.

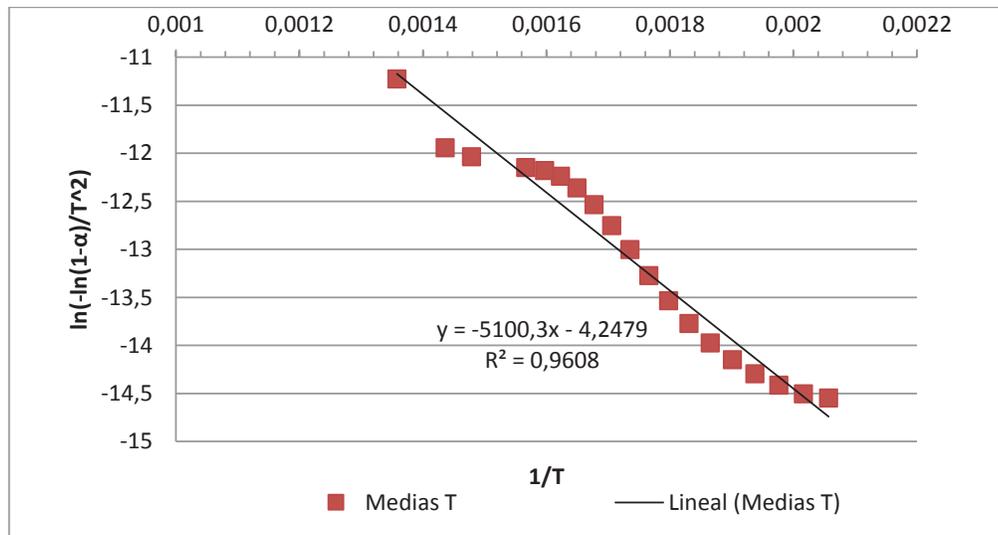


Figura AII.2. Linealización de la zona de medias temperaturas para la obtención de los parámetros cinéticos de la celulosa.

En la Figura AII.2 se observa la linealización de la zona de medias temperaturas y la ecuación obtenida a partir de la cual se obtienen los parámetros cinéticos para la celulosa. De igual manera que para la determinación del peso inicial para la lignina se determina el peso inicial de la celulosa. Este peso se lo calcula con base en el peso remanente de la caña guadua restado el peso de la lignina. De esta manera, la ecuación para el cálculo del peso inicial del componente 2, que en este caso es la celulosa, queda de la siguiente manera.

$$W_2 = (W_a - W_1) \cdot \exp \left\{ -\frac{A_2 RT_m^2}{\beta E_2} \left[1 - \frac{2RT_m}{E_2} + 4 \left(\frac{RT_m}{E_2} \right)^2 \right] \exp \left(-\frac{E_2}{RT} \right) \right\}$$

$$W_2 = (6,419 - 2,0014) \cdot \exp \left\{ -\frac{5,45 \times 10^{18} \times 8,31 \times 543^2}{10 \times 215,76} \left[1 - \frac{28,31 \times 543}{215,76} + 4 \left(\frac{8,31 \times 543}{215,76} \right)^2 \right] \exp \left(-\frac{215,76}{8,31 \times 543} \right) \right\}$$

$$W_2 = 2,6529 \text{ g}$$

En la Figura AII.3. se observa la linealización en la zona de baja temperatura y la determinación de los parámetros cinéticos para la hemicelulosa.

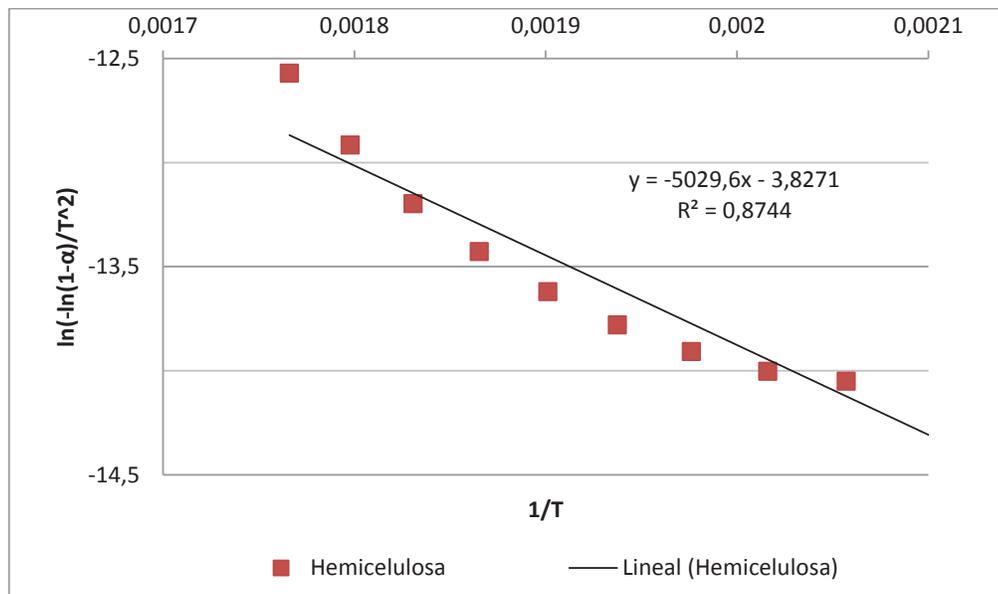


Figura AII.3. Linealización de la zona de medias temperaturas para la obtención de los parámetros cinéticos de la hemicelulosa.

Para el cálculo del peso de la hemicelulosa solo se restó el valor total del peso de los otros 2 componentes, pero para el cálculo de los parámetros cinéticos se procedió de igual manera a linealizar la curva TGA usando el método propuesto para los otros 2 componentes.

Ficha Técnica #II.1

Tipo de muestra: Cenizas disgregadas de caña guadua

Tipo de ensayo: Espectrometría de absorción atómica

Objetivo: Determinar la presencia de Al, Si, Ca, Mg, Na, K y Fe en la estructura de la caña guadua.

Tabla AII.3. Determinación de metales en las cenizas de la caña guadua

	Al	Si	Ca	Mg	Na	K	Fe
Muestra (mg/L)	112	190	173	121	293	201	2,95
Blanco	47	72	106	84	221	93	0,21
Muestra (mg/g cenizas)	32,5	59	33,5	18,5	36	54	1,37
Concentración (mg/g caña guadua)	0,93	1,71	0,97	0,53	1,04	1,56	0,039

ANEXO III
EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CARBONIZACIÓN DE
LA CAÑA GUADUA A ESCALA LABORATORIO

Ficha Técnica #III.1

Tipo de muestra: Caña guadua

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 350 °C

Objetivo: Determinar el porcentaje de carbón fijo, volátiles y cenizas

Tabla AIII.1. Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 350 °C

Temperatura	350 °C	
Tiempo (h)	1	2
Masa inicial (g)	5,439	4,869
Masa Final (g)	2,413	2,101
Rendimiento (%)	44,36	43,15
M muestra (g)	1,0042	1,0003
Masa 7min (g)	0,3686	0,3085
Masa 2hrs (g)	0,5537	0,6006
Masa final (g)	0,0818	0,0911
%volátiles	36,71	30,85
%carbón	55,14	60,05
%cenizas	8,15	9,1

Ficha Técnica #III.2

Tipo de muestra: Caña guadua

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 400 °C

Objetivo: Determinar el porcentaje de carbón fijo, volátiles y cenizas

Tabla AIII.2. Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 400 °C.

Temperatura	400 °C			
Tiempo (h)	0,5	1,0	2,0	2,5
Masa inicial (g)	4,81	3,41	4,54	5,12
Masa Final (g)	1,714	1,19	1,47	1,61
Rendimiento (%)	35,60	34,83	32,42	31,42
M muestra (g)	1,0033	1,0020	1,0032	1,0025
Masa 7min (g)	0,35	0,34	0,33	0,29
Masa 2hrs (g)	0,55	0,58	0,63	0,64
Masa final (g)	0,096	0,086	0,042	0,062
%volátiles	34,85	33,57	33,07	29,33
%carbón	55,50	57,76	62,66	64,45
%cenizas	9,65	8,66	4,27	6,22

Ficha Técnica #III.3

Tipo de muestra: Caña guadua

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 500 °C

Objetivo: Determinar el porcentaje de carbón fijo, volátiles y cenizas

Tabla AIII.3. Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 500 °C.

Temperatura	500 °C			
Tiempo (h)	0,5	1,0	2,0	2,5
Masa inicial (g)	4,802	5,331	4,923	5,216
Masa Final (g)	1,501	1,573	1,351	1,411
Rendimiento (%)	31,26	29,51	27,44	27,05
M muestra (g)	1,0019	1,0002	1,0003	1,0005
Masa 7min (g)	0,305	0,2824	0,2586	0,2145
Masa 2hrs (g)	0,5944	0,6372	0,6636	0,7088
Masa final (g)	0,1024	0,0855	0,0792	0,0771
%volátiles	30,45	28,23	25,85	21,44
%carbón	59,33	63,71	66,34	70,85
%cenizas	10,22	8,55	7,92	7,71

Ficha Técnica #III.4

Tipo de muestra: Caña guadua

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 600 °C

Objetivo: Determinar el porcentaje de carbón fijo, volátiles y cenizas

Tabla AIII.4. Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 600 °C.

Temperatura	600 °C			
Tiempo (h)	0,5	1,0	2,0	2,5
Masa inicial (g)	5,912	4,935	5,715	5,538
Masa Final (g)	1,519	1,259	1,447	1,393
Rendimiento (%)	25,69	25,51	25,32	25,15
M muestra (g)	1,0021	1,0011	1,0001	1,0031
Masa 7min (g)	0,1249	0,1125	0,0931	0,0879
Masa 2hrs (g)	0,7928	0,8078	0,8335	0,8414
Masa final (g)	0,0842	0,0819	0,0744	0,0737
%volátiles	12,47	11,24	9,31	8,77
%carbón	79,12	80,69	83,34	83,88
%cenizas	8,41	8,18	7,44	7,35

Ficha Técnica #III.5

Tipo de muestra: Caña guadua

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 650 °C

Objetivo: Determinar el porcentaje de carbón fijo, volátiles y cenizas

Tabla AIII.5. Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 650 °C.

Temperatura	650 °C	
Tiempo (h)	1,0	2,0
Masa inicial (g)	5,065	5,843
Masa Final (g)	1,105	1,169
Rendimiento (%)	21,82	20,01
M muestra (g)	1,0017	1,0006
Masa 7min (g)	0,131	0,0813
Masa 2hrs (g)	0,7925	0,8364
Masa final (g)	0,078	0,0828
%volátiles	13,08	8,13
%carbón	79,12	83,59
%cenizas	7,8	8,28

ANEXO IV

PRUEBA A ESCALA PILOTO PARA LA CARBONIZACIÓN DE LA CAÑA GUADUA.

Ficha Técnica #IV.1

Tipo de muestra: Caña guadua

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 600 °C en horno piloto mono solera Nichols Herreshoff con lecho fijo.

Objetivo: Determinar la cinética de carbonización de la caña guadua a escala piloto.

Tabla AIV.1. Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 600 °C en el horno piloto monosolera Nichols Herreshoff en lecho fijo.

Ensayo		M0	M1	M2	M3	M4
Tiempo	min	0	15	30	45	60
Peso crisol	g	-	23,0932	19,7892	23,0798	24,2543
Peso muestra	g	-	1,0013	1,0025	1,0032	1,0013
Peso 7 min	g	-	23,8892	20,6067	23,928	25,1505
ΔP 7 min	g	-	0,2053	0,185	0,155	0,1051
Peso 2 horas	g	-	23,1982	19,9025	23,2046	24,4105
ΔP 2 horas	g	-	0,691	0,7042	0,7234	0,74
%volátiles	%	81,63	20,5	18,45	15,45	10,5
%carbón	%	15,48	69,01	70,24	72,11	73,9
%cenizas	%	2,89	10,49	11,3	12,44	15,6

Ficha Técnica #IV.2

Tipo de muestra: Caña guadua

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 600 °C en horno piloto mono solera Nichols Herreshoff con lecho agitado.

Objetivo: Determinar la cinética de carbonización de la caña guadua a escala piloto.

Tabla AIV.2. Resultados del contenido de carbón fijo, volátiles y cenizas para la carbonización de la caña guadua a 600 °C en el horno piloto monosolera Nichols Herreshoff en lecho agitado.

Ensayo		M0	M1	M2	M3	M4
Tiempo	min	0	15	30	45	60
Peso crisol	g		31,0283	24,2701	23,1791	20,8933
Peso muestra	g		1,0006	1,0021	1,0003	1,0072
Peso 7 min	g		31,7389	25,1331	24,0169	21,7515
ΔP 7 min	g		0,29	0,1391	0,1625	0,149
Peso 2 horas	g		31,1277	24,3829	23,2673	20,9941
ΔP 2 horas	g		0,6112	0,7502	0,7496	0,7574
%volátiles	%	81,63	28,98	13,88	16,25	14,79
%carbón	%	15,48	61,08	74,86	74,94	75,2
%cenizas	%	2,89	9,93	11,26	8,82	10,01

Ficha Técnica #IV.3

Tipo de muestra: Caña guadua

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 600 °C en horno piloto mono solera Nichols Herreshoff con lecho fijo.

Objetivo: Determinar el tiempo de residencia para la carbonización de la caña guadua a escala piloto.

Tabla AIV.3. Hoja de datos del ensayo piloto de carbonización de la caña guadua

Obs.	Temperatura (°C)	Hora	Caudal de aire ΔP_a (mmH ₂ O)	Caudal de gas ΔP_g (mmH ₂ O)	λ	Agitador (RPM)	Observacion
1	50	7h30	35	24	1,00	0	Inicio ensayo
2	621	12h25	25	20	0,90	4	Cambio de atmósfera
3	551	12h44	25	20	0,90	4	Carga de 2 kg de caña guadua
4	599	12h59	25	20	0,90	4	Muestreo
5	600	13h14	25	20	0,90	4	Muestreo
6	600	13h29	25	20	0,90	4	Muestreo
7	609	13h44	20	16	0,91	4	Descarga de muestra
8	591	15h03	25	20	0,90	4	Cargade 4kg de caña guadua lecho agitado
9	606	15h18	25	20	0,90	4	Muestreo
10	593	15h33	20	16	0,90	4	Muestreo
11	610	15h48	20	16	0,91	4	Muestreo
12	610	16h03	20	16	0,91	4	Descarga de muestra
13	622	16h52	25	20	0,90	4	Carga de 4kg de Caña guadua
14	605	17h52	25	20	0,90	4	Fin del ensayo

ANEXO V

EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA ACTIVACIÓN QUÍMICA CON HIDRÓXIDO DE POTASIO DEL CARBÓN DE LA CAÑA GUADUA.

Ficha Técnica #V.1

Tipo de muestra: Carbón de caña guadua impregnado con KOH

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 600, 700, 800 y 900 °C a escala laboratorio

Objetivo: Determinar el índice de yodo de carbón de caña guadua activado a diferentes temperaturas.

Tabla AV.1. Resultados de índice de yodo para la activación del carbón de la caña guadua impregnado con KOH en un tiempo de 2 horas a escala piloto.

T	600 °C		700°C		800°C		900°C	
	Tiosulfato gastado (mL)	Nr o I ₂	Tiosulfato gastado (mL)	Nr o I ₂	Tiosulfato gastado (mL)	Nr o I ₂	Tiosulfato gastado (mL)	Nr o I ₂
1	14,8	267	9,8	333	11,6	613	15,0	397
2	16,0	253	7,8	364	14,0	553	12,2	449
3	15,0	265	6,6	388	12,6	441	8,4	354

Ficha Técnica #V.2.

Tipo de muestra: Carbón de caña guadua impregnado con KOH

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 800 °C a escala laboratorio

Objetivo: Determinar el índice de yodo de carbón de caña guadua activado a 800 °C.

Tabla AV.2. Resultados de índice de yodo para la activación del carbón de la caña guadua impregnado con KOH a 800 °C a escala laboratorio.

Tiempo (h)	1		2		3		4	
KOH/C	Tiosulfato gastado (mL)	Nro I ₂						
1	15,2	263	11,6	613	15,2	525		
2	13,4	284	14,0	553	16	761	17,6	710
3	15,8	256	12,6	441	16	253		

ANEXO VI

**PRUEBAS A ESCALA PILOTO PARA LA ACTIVACIÓN QUÍMICA
CON HIDRÓXIDO DE POTASIO DEL CARBÓN DE LA CAÑA
GUADUA**

Ficha Técnica #VI.1

Tipo de muestra: Carbón de caña guadua impregnado con KOH

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 800 °C a escala piloto

Objetivo: Determinar el tiempo de residencia para la activación del carbón de la caña guadua impregnado con KOH a escala piloto.

Tabla AVI.1. Resultados de índice de yodo para la activación del carbón de la caña guadua impregnado con KOH a 800 °C en el horno piloto monosolera Nichols Herreshoff.

Muestra	Tiempo	Tiosulfato gastado	Índice de Yodo
	h	mL	mg I₂/g C.A.
1	0,5	33,4	101
2	1,0	28,5	204
3	1,5	17,2	241
4	2,0	17,2	361
5	2,5	5,0	422
6	3,0	10,0	499
7	3,5	7,1	570
8	4,0	11,4	619
9	4,5	10,2	655
10	5,0	10,0	661

Ficha Técnica #VI.2

Tipo de muestra: Carbón de caña guadua impregnado con KOH

Tipo de ensayo: Carbonización en atmósfera inerte a 800 °C a escala piloto

Objetivo: Determinar el tiempo de residencia para la activación del carbón de la caña guadua impregnado con KOH a escala piloto.

Tabla AVI.2. Hoja de datos del ensayo piloto para la activación del carbón de la caña guadua.

Obs.	Temperatura (°C)	Hora	Caudal de aire ΔPa (mmH ₂ O)	Caudal de gas ΔPg (mmH ₂ O)	λ	Agitador (RPM)	Observacion
1	853	7h27	15	12	0,88	4	Inicio de ensayo
2	803	8h43	15	15	0,94	4	Carga de 2 kg de carbón impregnado
3	808	9h12	10	9	0,86	4	Muestreo
4	805	9h42	15	12	0,92	4	Muestreo
5	803	10h13	10	8	0,91	4	Muestreo
6	799	10h43	10	8	0,91	4	Muestreo
7	803	11h13	10	8	0,91	4	Muestreo
8	800	11h44	5	4	0,91	4	Muestreo
9	806	12h13	10	8	0,91	4	Muestreo
10	803	12h45	10	8	0,91	4	Muestreo
11	797	13h12	15	12	0,91	4	Muestreo
12	812	13h42	15	12	0,91	4	Muestreo
13	806	13h50	10	8	0,91	0	Fin del ensayo

ANEXO VII

DISEÑO DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE 10 T/MES DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA CAÑA GUADUA MEDIANTE ACTIVACION QUIMICA CON HIDROXIDO DE POTASIO

Ejemplo de cálculo para la determinación de la cantidad de combustible necesario para los procesos de carbonización y activación.

De acuerdo al balance de masa, se requieren de 45 000 kg/mes de caña guadua para producir 10 644 kg/mes de carbón activado. Como el proceso de carbonización solo operará durante 15 días, se calculó el flujo diario de caña guadua durante estos primeros 15 días.

$$45\,000 \frac{kg}{mes} \times \frac{1\,mes}{15\,días} \times \frac{1\,día}{12\,h} = \frac{468,72\,kg}{h}$$

De acuerdo a los rendimientos obtenidos en el análisis TGA y las pruebas a escala laboratorio y piloto se determinó los flujos de gas de pirólisis y carbón producidos:

$$468,72 \frac{kg\,Caña\,Guadua}{h} \times \frac{26,6\,kg\,carbón}{100\,kg\,Caña\,guadua} = 119,57 \frac{kg}{h}\,Carbón$$

$$468,72 \frac{kg\,Caña\,Guadua}{h} \times \frac{73,4\,kg\,Gas\,pirólisis}{100\,kg\,Caña\,guadua} = 76,45 \frac{kg}{h}\,Gas\,pirólisis$$

A partir del resultado de la cantidad de carbón producido se determinó la cantidad de combustible a partir de la entalpía de reacción de la caña guadua. La energía necesaria para pirolizar la caña guadua va a ser proporcionada por la combustión del GLP. Se usó el resultado obtenido por Oyedum et al. (2013) para la pirólisis del bambú (p. 602). y se asumió que el comportamiento durante la pirólisis de la caña guadua es similar al del bambú.

$$Q_{pirólisis} = -367,99 \frac{kJ}{kg \text{ Bambú}} \times \frac{1 \text{ kg Bambú}}{0,266 \text{ kg Carbón}} \times \frac{1000 \text{ kg Carbón}}{1 \text{ mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}}$$

$$\times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}}$$

$$Q_{pirólisis} = -40\,086,1 \frac{kJ}{h}$$

Para el cálculo de GLP necesario para la pirólisis se tiene el poder calórico del GLP es de -10 830 Kcal/kg (REPSOL, 2006, p. 4). es decir tiene un poder calórico de 45 269,4 kJ/kg. A partir de esto se calculo la masa de GLP necesaria para pirolizar la caña guadua a 600 °C:

$$Q_{pirólisis} = Q_{GLP}$$

$$-40\,086,1 \frac{kJ}{h} = \dot{m}_{GLP} \times 45\,269,4 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{m}_{GLP} = 10,37 \frac{kg \text{ GLP}}{h}$$

Además el horno necesitará una cantidad extra GLP durante la segunda mitad del mes para alcanzar los 800 °C para el proceso de activación. El calor extra que debe entregar es para calentar los gases de pirólisis y la entalpía de reacción de la activación química. Además se asumió que existen perdidas de calor de alrededor del 10%. El cálculo de esta cantidad extra de GLP se detalla a continuación.

$$\dot{m}_{GLP} \cdot 45\,269,4 \frac{kJ}{kg} = \dot{m}_{Gases} \cdot cp_{gases} \Delta T + 0,1 \dot{m}_{GLP} \cdot 45\,269,4 \frac{kJ}{kg} + \dot{m}_{carbón} \times \Delta H_{rx}$$

$$\dot{m}_{GLP} \cdot 45\,269,4 \frac{kJ}{kg} = 150,35 \frac{kg}{h} \cdot 1,051 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot 200 \text{ } ^\circ C + 0,1 \dot{m}_{GLP} \cdot 45\,269,4 \frac{kJ}{kg} +$$

$$119,57 \frac{kg}{h} \times \left(-47,008 \frac{kJ}{mol \text{ Carbón}} \cdot \frac{1 \text{ kmol}}{12 \text{ kg}} \cdot \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kmol}} \right)$$

$$\dot{m}_{GLP} (\text{activación}) = 8,75 \frac{kg}{h}$$

$$\dot{m}_{GLP} (\text{Total}) = 8,75 \frac{kg \text{ GLP}}{h} \cdot 24 \text{ h} \cdot 15 \text{ días} + 10,37 \frac{kg \text{ GLP}}{h} \cdot 24 \text{ horas} \cdot 30 \text{ días}$$

$$m_{GLP} (Total) = 9\,900 \frac{kg}{mes}$$

Se asume que la composición del GLP es de 60 % propano y 40 % butano. A partir de esta composición se determina la cantidad de oxígeno necesaria para que combustione completamente el GLP de acuerdo al mecanismo de las reacciones 3.1 y 3.2.

- Para C_3H_8

$$125,44 \frac{mol\ C_3H_8}{h} \times \frac{4\ mol\ O_2}{mol\ C_3H_8} = 501,77 \frac{mol\ O_2}{h}$$

- Para C_4H_{10}

$$83,62 \frac{mol\ C_4H_{10}}{h} \times \frac{11\ mol\ O_2}{mol\ C_4H_{10}} = 459,96 \frac{mol\ O_2}{h}$$

$$Mol\ O_2\ totales = 961,73\ mol\ O_2 \times \frac{100\ mol\ Aire}{21\ mol\ O_2} \times \frac{28,96\ g\ Aire}{mol\ Aire} \times \frac{1\ kg}{1\,000\ g}$$

$$Flujo\ de\ aire = 2\,785,17 \frac{kg\ Aire}{h}$$

Como el horno operará en atmósfera reductora, con un factor lambda (λ) de 0,9 se debe determinar el flujo de aire que ingresará al horno a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{O_2\ entrada}{O_2\ Estequiométrico}$$

$$O_2\ entrada = \lambda \times O_2\ Estequiométrico$$

$$O_2\ entrada = 0,9 \times 961,73\ mol\ O_2$$

$$O_2\ entrada = 865,55\ mol\ O_2$$

Cálculo de la composición de los gases de salida del horno de carbonización

Para el cálculo de los gases de combustión se usó las ecuaciones 3.1 y 3.2 y a partir de estas calcular su composición. Se presenta el cálculo de cada uno de los gases producidos.

- Para el CO

$$83,62 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{2 \text{ mol } CO}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 83,62 \frac{\text{mol } CO}{h}$$

$$125,44 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{1 \text{ mol } CO}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 125,44 \frac{\text{mol } CO}{h}$$

$$\text{Total } CO = 209,06 \frac{\text{mol } CO}{h} \rightarrow 5,85 \frac{\text{kg } CO}{h}$$

- Para el CO₂

$$83,62 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{6 \text{ mol } CO_2}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 250,86 \frac{\text{mol } CO_2}{h}$$

$$125,44 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{2 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } C_3H_8} = 250,88 \frac{\text{mol } CO_2}{h}$$

$$\text{Total } CO_2 = 501,74 \frac{\text{mol } CO_2}{h} \rightarrow 25,90 \frac{\text{kg } CO_2}{h}$$

- Para el H₂

$$83,62 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{1 \text{ mol } H_2}{1 \text{ mol } C_4H_{10}} = 83,62 \frac{\text{mol } H_2}{h}$$

$$125,44 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{2 \text{ mol } H_2}{2 \text{ mol } C_3H_8} = 125,44 \frac{\text{mol } H_2}{h}$$

$$\text{Total } H_2 = 209,06 \frac{\text{mol } H_2}{h} \rightarrow 3,77 \frac{\text{kg } H_2}{h}$$

- Para el H₂O

$$83,62 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{3 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } C_4H_{10}} = 250,86 \frac{\text{mol } H_2O}{h}$$

$$125,44 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{8 \text{ mol } H_2O}{2 \text{ mol } C_3H_8} = 501,76 \frac{\text{mol } H_2O}{h}$$

$$\text{Total } H_2 = 751,42 \frac{\text{mol } H_2O}{h} \rightarrow 13,52 \frac{\text{kg } H_2O}{h}$$

- Para el N₂

$$865,55 \text{ mol } O_2 \times \frac{79 \text{ mol } N_2}{21 \text{ mol } O_2} = 3617,94 \frac{\text{mol } N_2}{h} \rightarrow 101,30 \frac{\text{kg } N_2}{h}$$

Así la composición de los gases de salida del horno se muestra en la Tabla AVII.1.

Tabla AVII.1 Composición de los gases de salida del horno rotatorio de carbonización

Gases	Flujo molar (mol/h)	Flujo másico (kg/h)	% moles	% masa
CO	209,06	5,85	3,88	3,89
CO ₂	588,86	25,909	10,95	17,23
H ₂	209,06	3,77	3,88	2,50
H ₂ O	751,42	13,52	13,97	8,99
N ₂	3 617,94	101,302	67,29	67,37
Total	5 376,34	150,35	100	100

Dimensionamiento de la cámara de postcombustión

Se dimensionó una cámara de postcombustión con el fin de reducir la emisión de monóxido de carbono (CO) y de hidrógeno (H₂), que se consideran gases de efecto invernadero y que son producidos debido a la combustión incompleta del GLP en el horno rotatorio.

Para el cálculo de la composición de los gases de salida se utilizaron las ecuaciones 3.3 y 3.4. y así se determinó que flujo de aire se necesita para oxidar completamente el GLP la nueva composición de los gases de salida.

- Cálculo del oxígeno necesario

$$209,06 \frac{\text{mol } H_2}{h} \times \frac{0,5 \text{ mol } O_2}{\text{mol } H_2} = 104,53 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$209,06 \frac{\text{mol } CO}{h} \times \frac{0,5 \text{ mol } O_2}{\text{mol } CO} = 104,53 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

Se necesita un 10 % de moles de GLP para oxidar el hidrogeno y el monóxido de carbono.

$$209,06 \frac{\text{mol } O_2}{h} \times 0,1 = 20,90 \frac{\text{mol } GLP}{h} \rightarrow 1,036 \frac{\text{kg } GLP}{h}$$

Además se necesita un 20 % de exceso de aire para lograr la combustión completa. Esta cantidad de aire se calculó de la siguiente manera.

$$12,54 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{4 \text{ mol } O_2}{\text{mol } C_3H_8} = 50,16 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$8,36 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{11 \text{ mol } O_2}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 45,98 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$\text{Total } O_2 = 96,14 \frac{\text{mol } O_2}{h} \cdot 1,2 = 115,36 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

$$\text{Total Aire} = 549,37 \frac{\text{mol Aire}}{h} \rightarrow 15,90 \frac{\text{kg Aire}}{h}$$

De este flujo de GLP de igual forma se tiene en su composición 60 % de propano y 40 % de butano. A partir de estos flujos se calcula la cantidad de dióxido de carbono y vapor de agua que se forma usando nuevamente las ecuaciones 3.1. y 3.2.

- Para el CO₂.

$$12,54 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{2 \text{ mol } CO_2}{\text{mol } C_3H_8} = 25,08 \frac{\text{mol } CO_2}{h}$$

$$8,36 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{6 \text{ mol } CO_2}{2 \text{ mol } C_4H_{10}} = 25,08 \frac{\text{mol } CO_2}{h}$$

$$\text{Total } CO_2 = 50,16 \frac{\text{mol } CO_2}{h}$$

- Para el H₂O.

$$12,54 \frac{\text{mol } C_3H_8}{h} \times \frac{3 \text{ mol } H_2O}{\text{mol } C_3H_8} = 37,62 \frac{\text{mol } H_2O}{h}$$

$$8,36 \frac{\text{mol } C_4H_{10}}{h} \times \frac{8 \text{ mol } H_2O}{\text{mol } C_4H_{10}} = 66,88 \frac{\text{mol } H_2O}{h}$$

$$\text{Total } H_2O = 104,5 \frac{\text{mol } H_2O}{h}$$

- Para el O₂

$$O_{2 \text{ sale}} = O_{2 \text{ ingresa}} - O_{2 \text{ no RX}}$$

$$O_{2 \text{ sale}} = 115,36 - 96,14 = 19,22 \frac{\text{mol } O_2}{h}$$

- Para el N₂

$$115,36 \frac{\text{mol } O_2}{h} \times \frac{79 \text{ mol } N_2}{21 \text{ mol } O_2} = 433,74 \frac{\text{mol } N_2}{h}$$

Diseño de la cámara de enfriamiento.

La cámara de enfriamiento del carbón y carbón activado es un intercambiador de calor concéntrico que se encuentra inmediatamente a la salida del horno rotatorio.

Por la parte interna del intercambiador sale el flujo de carbón y por la parte concéntrica circula agua como fluido refrigerante. Este diseño se basó en un balance de energía que establece que el calor que pierde el carbón es equivalente al que gana el agua de enfriamiento. El flujo de agua para enfriar el carbón hasta los 40 °C se calculó de la siguiente manera:

$$Q_{\text{carbón}} = -Q_{\text{agua}}$$

$$119,57 \frac{\text{kg Carbón}}{\text{h}} \cdot 1,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (760 \text{ K}) = -\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (-65 \text{ K})$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 139,469 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Para el cálculo de las dimensiones del intercambiador se asumió un coeficiente de transferencia de calor de $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (Bonilla, 2011, p. 19).

$$Q_{\text{agua}} = U \cdot A \cdot LMTD$$

$$10526 \text{ W} = 5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot A \cdot \left(\frac{(800 - 90) - (40 - 25)}{\ln \frac{(800-90)}{(40-25)}} \right)$$

$$A = 13,45 \text{ m}^2$$

Se asume una longitud de 4 m del intercambiador para poder obtener un diámetro de 0,83 m.

Determinación de las dimensiones del horno rotatorio de carbonización

Para la determinación de las dimensiones del horno se utilizaron las ecuaciones 2.8. y 2.9. que son de diseño de hornos rotatorios. Se utilizó un relación diámetro largo (D/L) inicial de 20. Las dimensiones serán determinadas para que el horno opere a 800 °C, que es la máxima temperatura a la que trabajará, y para un tiempo inicial de 5 horas, que es el máximo tiempo que operará para producir el carbón activado.

Los parámetros para aplicar las ecuaciones 2.8 y 2.9 se presentan a continuación.

Tabla AVII.2. Parámetros para el dimensionamiento del horno rotatorio de carbonización y activación

Parámetro	Símbolo	Valor
Flujo de alimentación	W_s	1,73 kg/min
Tiempo	t	300 min
Longitud	L	20 m
Grado de llenado	g_r	8 %
Densidad del sólido	ρ	860 kg/m ³
Velocidad de giro	N	3 RPM
Ángulo de reposo	ϑ	33,97 °
Grado de inclinación del horno	p	5 °

$$D = \sqrt{\frac{W_s \times 4 \times t}{L \times g_r \times \pi \times \rho}} = \sqrt{\frac{1,73 \times 4 \times 300}{20 \times 8 \times \pi \times 860}} = 0,92 \text{ m}$$

$$t^3 = \frac{1,77 \times L^3 \times g_r \times \pi \times \rho \times \vartheta}{p^2 \times D \times W_s \times 4 \times N^2} = \frac{1,77 \times 20^3 \times 8 \times \pi \times 860 \times 33,97}{5^2 \times 1 \times 1,73 \times 4 \times 3^2} = 873,49 \text{ min}$$

Con los nuevos parámetros determinados, se volvió a recalcular las dimensiones hasta lograr la convergencia con la relación L/D. De esta manera se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.15.

Dimensionamiento del sistema de reducción de tamaño del carbón activado.

Para el dimensionamiento del sistema de reducción de tamaño se tomó en cuenta que esta parte del proceso solo trabajará durante 8 horas diarias. La capacidad de procesamiento de los molinos seleccionados se calculó de la siguiente manera.

$$107,14 \frac{\text{kg C. Activado}}{h} \cdot \frac{8 \text{ h}}{\text{día}} = 857,12 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

De acuerdo a la capacidad del molino seleccionado según el catálogo consultado se determinó la energía que consumirá el sistema de molienda.

$$126 \text{ kW} \cdot \frac{1 \text{ h}}{0,107 \text{ t C. Activado}} = 1177,57 \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{t}}$$

ANEXO VIII

**EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD ECONÓMICA PARA LA
INSTALACIÓN DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE 10
T/MES DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE LA CAÑA GUADUA
MEDIANTE ACTIVACIÓN QUÍMICA**

Tabla AVIII.1. Costos de maquinaria y equipo del que consta la planta de producción de carbón activado.

Designación del equipo	Número de unidades	Valor Unitario (USD)	Valor Total (USD)	Dividendo Anual de Amortización (USD)
Silos y tanques	5	3 000,00	15 000,00	3 000,00
Horno de carbonización	1	30 000,00	30 000,00	6 000,00
Filtro de presión	4	1 500,00	6 000,00	1 200,00
Molino de martillos	1	2 000,00	2 000,00	400,00
Secadores	2	1 500,00	3 000,00	600,00
Intercambiador de calor	1	1 500,00	1 500,00	300,00
	TOTAL		57 500,00	11 500,00

Tabla AVIII.2. Costos de equipos y muebles de oficina del que consta la planta de producción de carbón activado.

Denominación	Número de unidades	Valor Unitario (USD)	Valor Total (USD)	Dividendo Anual de Amortización (USD)
Escritorio	2	100,00	200,00	40,00
Sillones para escritorio	6	15,00	90,00	18,00
Computadores	2	850,00	1 700,00	340,00
Archivadores	1	25,00	25,00	5,00
Estanterías y repisas	1	50,00	50,00	10,00
Sillas	8	15,00	120,00	24,00
mesa de conferencia	1	100,00	100,00	20,00
TOTALES	33	1 750,00	5 820,00	1 164,00

Tabla AVIII.3. Flujo de caja para los primeros 5 años del proyecto "Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química usando KOH"

Designación	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Aportación de Socios (USD)	50 000,00					
Ingresos por Ventas (USD)		717 270,40	717 270,40	717 270,40	717 270,40	717 270,40
(-) Costo de Producción		2 561 191,27	66 779,63	66 779,63	66 779,63	66 779,63
Flujo bruto		-1 843 920,87	650 490,77	650 490,77	650 490,77	650 490,77
Dividendo de financiamiento	119 337,50	19 421,63	19 421,63	19 421,63	19 421,63	19 421,63
Flujo antes de impuestos		-1 863 342,50	631 069,14	631 069,14	631 069,14	631 069,14
(-) Impuesto a la renta		-204 967,67	69 417,61	69 417,61	69 417,61	69 417,61
Flujo despues de impuestos		-1 658 374,82	561 651,54	561 651,54	561 651,54	561 651,54
Flujo Acumulativo		-1 827 712,32	-1 266 060,79	-704 409,25	-142 757,71	418 893,82
INVERSIÓN TOTAL	-169 337,50	-1 827 712,32	-1 266 060,79	-704 409,25	-142 757,71	418 893,82

Tabla AVIII.4. Flujo de caja para los segundos 5 años del proyecto "Planta de producción de carbón activado a partir de la caña guadua mediante activación química usando KOH"

Designación	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Aportación de socios					
Ingresos por ventas	717 270,40	717 270,40	717 270,40	717 270,40	717 270,40
(-) Costo de Producción	66 779,63	66 779,63	66 779,63	66 779,63	66 779,63
Flujo bruto	650 490,77	650 490,77	650 490,77	650 490,77	650 490,77
Dividendo de financiamiento	19 421,63	19 421,63	19 421,63	19 421,63	19 421,63
Flujo antes de impuestos	631 069,14	631 069,14	631 069,14	631 069,14	631 069,14
(-) Impuesto a la renta	69 417,61	69 417,61	69 417,61	69 417,61	69 417,61
Flujo despues de impuestos	561 651,54	561 651,54	561 651,54	561 651,54	561 651,54
Flujo Acumulativo	980 545,36	1 542 196,90	2 103 848,43	2 665 499,97	3 227 151,51
INVERSIÓN TOTAL	980 545,36	1 542 196,90	2 103 848,43	2 665 499,97	3 227 151,51