

Uso del bagazo de caña de azúcar y la activación básica, para la síntesis de carbón

Use of sugarcane bagasse and basic activation, for the synthesis of carbon

Dannis Adrian Cascaret-Carmenaty¹ <https://orcid.org/0000-0001-6515-7138>

Pedro Demetrio Muné Bandera², <https://orcid.org/0000-0003-1476-2228>

Manuel Angel Cantos-Macías³ <https://orcid.org/0000-0001-7589-0210>

Omaida Quesada-González^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-8878-4628>

¹ Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

² Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

³ Departamento de mecánica. Universidad Técnica de Manabí, República de Ecuador.

*Autor para la correspondencia: oquesada@uo.edu.cu

Recibido: 20 de diciembre de 2023

Aprobado: 29 de enero de 2024

RESUMEN

En este trabajo se obtienen carbones con fines energéticos, a partir de la impregnación del bagazo de caña de azúcar con hidróxido de sodio. Para su caracterización, se realizó análisis inmediato, elemental, técnicas de análisis térmico y estudios cinéticos. Se identifica la composición del bagazo de caña modificado, y que por sus menores contenidos de humedad y cenizas puede ser pirolizado. Se demuestra la menor influencia de la activación con hidróxido de sodio en el perfil térmico, con respecto al bagazo sin modificar, y se explica por la menor interacción del mismo con la biomasa, según mecanismos propuestos por otros autores. Se precisaron los parámetros cinéticos que determinan las reacciones estudiadas, demostrando la complejidad cinética del proceso. Se demuestra y explica la conductividad del carbón obtenido.

Palabras claves: cinética de la pirólisis; activación con NaOH; carbones.

ABSTRACT

In this work, coals are obtained for energy purposes by impregnating sugarcane bagasse with sodium hydroxide. For its characterization, immediate, elemental analysis, thermal analysis techniques and kinetic studies were carried out. The composition of the modified sugarcane bagasse is identified and that, due to its lower moisture and ash content, it can be pyrolyzed. The lower influence of activation with sodium hydroxide on the thermal profile is demonstrated, with respect to unmodified bagasse and is explained by its lower interaction with the biomass, according to mechanisms proposed by other authors. The kinetic parameters that determine the reactions studied were specified, demonstrating the kinetic complexity of the process. The conductivity of the carbon obtained is demonstrated and explained.

Keywords: kinetics of pyrolysis; activation with NaOH; carbons.

INTRODUCCIÓN

La biomasa es una fuente de energía renovable y disponible localmente, lo que la convierte en económica, ambiental y socialmente sostenible. Por estas razones se pueden reemplazar, tanto combustibles, como productos químicos, a través de su aprovechamiento, lo que presupone ahorros materiales, energéticos y cierta contribución a la mitigación del cambio climático.⁽¹⁾

Para su utilización, se aplican procesos de termoconversión que involucran la desvolatilización pirólítica de la biomasa, la que mejora las propiedades de los biocombustibles líquidos y sólidos, obtenidos en dicho proceso.^(2,3,4)

Los países latinoamericanos tienen un enorme potencial de recursos bioenergéticos, principalmente en los residuos del sector agroindustrial. Sin embargo, estos son bastante heterogéneos y escasamente caracterizados.

El bagazo de caña de azúcar es un residuo lignocelulósico y fibroso que representa el 28 % en peso de la caña que se procesa, por lo que es el coproducto de mayor tonelaje y volumen de esta industria, constituyendo su principal desperdicio. Su composición morfológica consta de cuatro fracciones: fibra (50 %), parénquima (30 %), vasos (15 %) y epidermis (5 %). Es un material versátil para utilizarlo como alimento para animales domésticos, fertilizante natural o combustible de la propia industria, en la producción de papel, cartón, endulzante para diabéticos, tableros aglomerados y tablas de fibras prensadas, entre otros.^(5,6)

La composición química de este residuo agroindustrial depende de las condiciones edafoclimáticas donde se desarrolla la caña de azúcar, y del proceso agroindustrial que lo genera,^(5,6) por lo que su caracterización resulta siempre imprescindible. Altamirano reportó la siguiente composición química del bagazo de caña: humedad 4 %, carbono 48,58 %, hidrógeno 5,97 %, oxígeno 38,94 % y nitrógeno 0,20 %. Además de celulosa (41-44 %), hemicelulosa (25-27 %), lignina (20-22 %) y otros componentes (8-10 %), entre ellos extractivos, sólidos solubles, cenizas, etcétera.⁽⁵⁾

Adinaveen refiere, que el bagazo de caña contiene lignina, celulosa, hemicelulosa, cenizas

y materia volátil. Dicho autor obtiene un carbón poroso a partir de dicho precursor a través de dos etapas: la primera, de precarbonización a 400 °C por 4 h, y otra de activación química con calentamiento entre 600-800 °C. El sólido obtenido muestra por difracción de rayos X un pico en 23,13° en 2θ e índices de miller (002), que se debe a una estructura gráfica hexagonal, cuyas capas se encuentran orientadas aleatoriamente.⁽⁷⁾

Las propiedades físico-químicas de los carbones obtenidos dependen del precursor, del tipo de agente activante y de los parámetros operacionales de la pirólisis, tales como: tiempo de impregnación, temperatura máxima, y velocidad de calentamiento, entre otros, por lo que es una temática frecuentemente abordada en la actualidad.^(8,9,10)

El término “carbón activado” se aplica a un grupo de carbones porosos preparados mediante reacción de un material con alto contenido de carbono con gases oxidantes o mediante la carbonización de materiales lignocelulósicos impregnados con agentes químicos deshidratantes. Son sólidos desordenados constituidos por carbono, con un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna, que se aplican, fundamentalmente, a procesos de adsorción, catálisis y energéticos.⁽¹⁰⁾

La síntesis de carbón activado aplicando el método químico, es bastante utilizada. Aunque el uso de agentes activantes básicos como los hidróxidos de potasio y sodio, es más reciente, y se aplican más a carbones minerales que a la biomasa. Algunos autores han preferido aplicarlos directamente a esta última.⁽¹¹⁾ El carbón obtenido es microporoso, con elevado volumen de poro y superficie específica. Para esta activación se admite un mecanismo en el que ocurre la descomposición del KOH para dar K₂O, que se reduce con el carbón. Los átomos de K metálico pueden intercalarse entre las láminas de los microcristales gráficos, aumentando su espaciado, el que incrementa la porosidad final cuando se eliminan dichos átomos durante los lavados.⁽¹¹⁾

Siguiendo esta estrategia de síntesis, la presente investigación tiene como objetivo caracterizar el bagazo de caña modificado con hidróxido de sodio, utilizando análisis elemental, inmediato y

análisis térmico y su aprovechamiento para la síntesis de carbón, lo que incluye el estudio cinético de su craqueo pirolítico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los equipos utilizados se encuentran disponibles en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad de Oriente. Los reactivos utilizados todos son puros para análisis.

La muestra objeto de estudio, bagazo de caña de azúcar, procede de la provincia Holguín, Cuba. El bagazo de caña se sometió a secado en Estufa Venticell (MMM) de procedencia española, según la norma UNE-EN-14774-1:2010,⁽¹²⁾ y posteriormente se somete a método de cuarteo hasta obtener 250 g, para lograr una muestra representativa, según procedimiento.⁽¹³⁾

Para la activación química de la biomasa objeto de estudio, se usa disolución de hidróxido de sodio de concentración 0,5 mol.L⁻¹, y una relación sólido: disolución de 1 g:6 mL. El bagazo fue impregnado con esta disolución por 24 h, y después filtrado y secado en la estufa a 105 °C.

Los procedimientos establecidos y los equipos utilizados para la caracterización inmediata y elemental del bagazo de caña impregnado con hidróxido de sodio, son descritos en ⁽¹³⁾. La primera incluye contenidos de humedad, materia volátil,⁽¹⁴⁾ cenizas⁽¹⁵⁾ y el carbón fijo por diferencia. La composición elemental (% C, % H y % O) se calculó preliminarmente, a partir de las expresiones matemáticas propuestas por Parikh y col.,⁽¹⁶⁾ empleando los datos obtenidos experimentalmente en el análisis inmediato.

El registro térmico se obtuvo en equipo de análisis térmico simultáneo de NETZSCH STA 449 F3 Jupiter®. Se utilizó una velocidad de calentamiento de 10 °C/min, con flujo de nitrógeno de 60 mL/min, para garantizar la atmósfera inerte y una muestra de 0,5 mg. El procesamiento de los datos de termogravimetría (ATG), termogravimetría derivada (TGD) y calorimetría diferencial de barrido (CDB) se realiza con el software Origin 8.1. Se estudiaron por estas técnicas tanto el bagazo natural, como el modificado con hidróxido de sodio.

El estudio cinético se lleva a cabo al aplicar el

método de ajuste de las funciones, tanto en su forma integral como derivada. Para la determinación de los coeficientes de correlación lineal (r) se utiliza el software Microsoft Excel 2007, lo que permite identificar los modelos cinéticos que determinan la velocidad de reacción. Para el cálculo de los parámetros cinéticos: energía de activación y modelo cinético, se emplea el software Origin 8.1 y la metodología de cálculo empleada por otro autor.⁽¹³⁾

Para la obtención del carbón experimentalmente se emplea el equipamiento presentado.⁽¹³⁾ El bagazo modificado con hidróxido de sodio se introduce en la cámara de pirólisis, y se hace pasar una corriente de gas inerte, en este caso helio. Posteriormente, se calienta entre 700-950 °C y se mantiene la temperatura entre 30-90 min. La muestra se enfría dentro del horno, manteniendo la atmósfera inerte, y posteriormente se coloca en una desecadora.

La medición de la conductividad eléctrica del carbón obtenido se realiza con equipamiento y procedimiento utilizados por Bahín Deroncelé,⁽¹³⁾ y propuestos por Muné Bandera.⁽¹⁷⁾

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis inmediato y elemental del bagazo de caña de azúcar modificado con hidróxido de sodio

La biomasa es heterogénea y sus fuentes son diversas, de ahí la importancia de su caracterización ⁽¹⁸⁾. En la tabla 1 se resumen los resultados del análisis elemental e inmediato.

El valor medio de humedad determinado para el bagazo modificado con hidróxido de sodio, fue de 6,83 ± 0,09 %. El mismo es bajo, y está condicionado por el secado de la biomasa, durante el proceso de preparación de la muestra. Macías reportó un valor de 7,6 %.⁽¹⁹⁾ En general, ofrece criterio para seleccionar la pirólisis, como proceso de termodescomposición.

Los compuestos volátiles son predominantes en la biomasa, y junto al carbón fijo son las fracciones que almacenan su energía química.⁽¹⁸⁾

El valor experimental fue de 83,57 ± 4,0 %, el que resulta similar al reportado por Macías de 82,55 %.⁽¹⁹⁾ Se conoce que la biomasa en general

tiene entre 60-80 % de esta fracción.⁽¹⁸⁾

El valor experimental de carbón fijo para el bagazo estudiado fue de $11,89 \pm 1,03$ %, mayor que el reportado por Macías de 8,30 % para un bagazo sin modificar.⁽¹⁹⁾ Una de las principales funciones de los agentes activantes, en este caso el NaOH, es la deshidratación del material que dará como consecuencia una reducción en la producción de bioaceites y gas de síntesis, y un aumento de la masa de carbonizados.⁽¹¹⁾

Los contenidos de cenizas en el bagazo estudiado son de 1,62 %, representan la materia inorgánica contenida en el mismo, y son bajos; por lo que disminuyen la formación de incrustaciones en los hornos de pirólisis, entre otras ventajas; Macías

reportó 3,9 %.

Los resultados del análisis elemental del bagazo de caña modificado con base, se presentan en la tabla 1, y se encuentran entre los límites propuestos por Parikh.⁽¹⁶⁾ El contenido de carbón es algo inferior al reportado por Macías de 46,6 %, para un bagazo de caña no modificado,⁽¹⁹⁾ y está en consonancia con el contenido de carbón fijo también encontrado. En función de la aplicación que se pretende como electrodo en bioceldas de combustibles, estos son los parámetros fundamentales. Este autor reporta 5,92 % de hidrógeno y 43,35 % de oxígeno comparables a los resultados experimentales presentados en esta investigación.

Tabla 1. Análisis inmediato y elemental del bagazo de caña modificado con NaOH.

BIOMASA	Análisis Inmediato			Vm	S	% CV
	VALORES EXPERIMENTALES					
Cenizas (%)	0.92	2.33	1.40	1.55	0.51	0.71
Materia volátil (%)	79.26	87.31	84.15	83.57	16.45	4.06
Humedad (%)	6.75	6.93	6.81	6.83	0.01	0.09
Carbón fijo (%)	13.07	11.20	11.40	11.89	1.05	1.03

Composición Elemental	Valor calculado	Intervalo
%C	45.62	$36,2\% \leq C \leq 53,1\%$
% H	5.79	$4,36\% \leq H \leq 8,3\%$
% O	42.99	$31,37\% \leq O \leq 49,5$

Influencia de la activación básica en los perfiles térmicos del bagazo de caña de azúcar modificado

Con la finalidad de demostrar esta influencia, se comparan las curvas TGD y ATG para el bagazo de caña modificado con NaOH y sin modificar, lo que se representa en las figuras 1 y 2.

Los perfiles térmicos TGD (figura 1) tienen la apariencia típica de biomasa lignocelulósica sometida a procesos pirolíticos. Aspecto ampliamente abordado en la literatura,⁽⁴⁾ que ha revelado que la degradación de sus constituyentes principales, tienen lugar en rangos de temperaturas muy concretos, indicando ocurren etapas claves en dichos procesos de descomposición, relacionadas con la deshidratación del material y la degradación térmica de la hemicelulosa, celulosa y lignina, dado su diferente estabilidad química y térmica, sin negar la gran complejidad que encierra el craqueo pirolítico de los mismos.^(4,20)

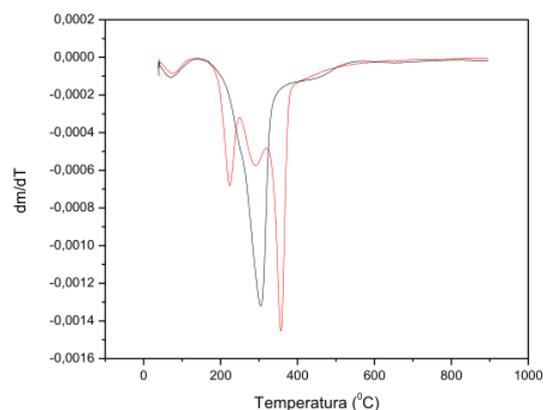


Fig. 1. Curvas de termogravimetría derivada del bagazo sin modificar (curva roja) y el modificado con NaOH.

Coincidentemente, en la curva TGD del bagazo de caña sin modificar (trazo rojo), se distingue un pico inicial relacionado con la deshidratación y otros tres picos que corresponden a la degradación de los constituyentes principales. En cambio, en dicha curva para el bagazo modificado con hidróxido de sodio (trazo negro),

se distingue el pico de deshidratación y esencialmente un único pico fino y grande que indica predominio de celulosa. En TGD, el área del pico se relaciona con la masa del constituyente. Este es el pico más grande, debido al predominio de la celulosa en la composición química del bagazo. Lo anterior no excluye la menor presencia de hemicelulosa y lignina que pueden identificarse por los cambios de pendientes en la curva.

En la figura 2 se muestran las curvas ATG del bagazo sin modificar (roja) y el modificado (negra). Inicialmente se observa que la deshidratación de ambos es similar, lo que demuestra que el NaOH como agente activante, no contribuye mucho a la deshidratación del material, a diferencia de la activación con sales y ácidos.⁽¹³⁾

En el rango *cuasi* isotérmico de la curva ATG, tampoco se distingue que el perfil térmico del bagazo modificado se corra a temperaturas inferiores, lo que demuestra la menor influencia del agente activante en el mismo.

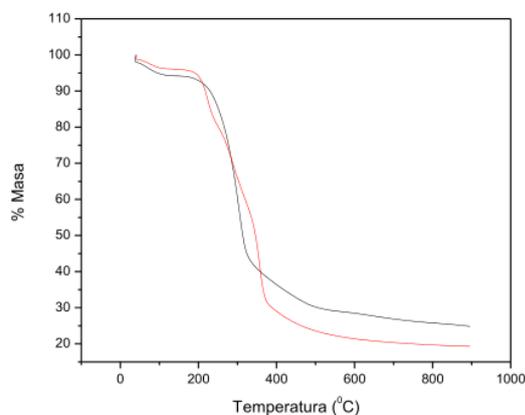


Fig. 2. Curvas de análisis termogravimétrico del bagazo sin modificar (roja) y el modificado con NaOH (negra).

Almansa propone un mecanismo para la activación básica, donde el NaOH no degrada sustancialmente a la biomasa, a diferencia de la activación salina y ácida,^(11,13) sino que se reduce en presencia del carbón a Na₂O y luego a sodio metálico.⁽¹¹⁾ Esta menor interacción entre el agente activante y la biomasa, explica la menor influencia sobre el perfil térmico, ya demostrada. Se manifiesta, a partir de la forma de la curva, que cuando se piroliza el bagazo de caña activado con base, se obtiene menor cantidad de materia volátil y mayor masa de carbón fijo, con respecto al bagazo sin modificar, lo que coincide con los resultados del análisis inmediato. Aunque vuelve

a ser evidente que son inferiores a los calculados por activación salina y ácida.⁽¹³⁾

Interpretación cualitativa de las curvas térmicas

A partir del análisis integrado de las curvas térmicas ATG y TGD, se distinguen tres etapas fundamentalmente. La primera, en un intervalo de temperatura entre 40-135 °C y una variación de masa asociada de 6,29 %, corresponde a la pérdida de humedad, valor que coincide con lo precisado para esta biomasa por análisis inmediato (6,83 %), y que se relaciona por las bajas temperaturas en que se desprende, con el agua exterior del material, aprovechando el término propuesto por Nogués.⁽¹⁸⁾

La segunda etapa ocurre en un intervalo de temperatura entre 143-407 °C, con una pérdida de masa de 58,45 %, y tiene que ver con la degradación inicialmente de la hemicelulosa (lo anuncia el hombro en la curva ATG), y posteriormente de la celulosa. La tercera etapa aparece en un intervalo de temperatura entre 408-800 °C y una variación de masa de 10,47 % corresponde a la degradación de la lignina.

Los aspectos antes referidos, permiten proponer los intervalos de temperatura en los que predomina la termodescomposición de los constituyentes principales de la biomasa, y que son la base del estudio cinético (tabla 2).

Tabla 2. Intervalos precisados para las etapas de la pirólisis del bagazo modificado estudiado.

Etapas	Intervalos de temperatura(°C)
Descomposición de la hemicelulosa	143-259
Descomposición de la celulosa	259-407
Descomposición de la lignina	407- 800

Análisis cinético de la pirólisis del bagazo de caña modificado con hidróxido de sodio

Cuando se estudian productos naturales formados por varios componentes, como es la biomasa, algunos autores prefieren considerar que el proceso ocurre en varias etapas, aplicando modelos cinéticos de reacciones paralelas e independientes.⁽²¹⁾ Una forma similar de abordar este estudio, a partir del conocimiento que se tiene del comportamiento térmico de la biomasa, es considerar intervalos de temperatura, en los

que prevalece la degradación de cada uno de los constituyentes principales de la biomasa.⁽²²⁾ Estos intervalos de temperatura referidos, para la biomasa objeto de estudio, son presentados en la tabla 2.

En las tablas 3 y 4, se representan los resultados del estudio cinético de la pirólisis del bagazo de caña modificado con hidróxido de sodio; cuando se aplican las ecuaciones de Coats y Achar, para las diferentes etapas de descomposición de la biomasa, a la velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

En el caso de la tabla 3, se presentan los resultados cinéticos de la degradación de la hemicelulosa. Esta etapa presenta una cinética compleja, porque varios modelos muestran coeficientes de correlación muy cercanos a uno, por ambos métodos. Tanto para la ecuación de Coats, como para la de Achar, se distinguen varios modelos cinéticos entre los probables (marcados en negritas), de ellos se escogen D1, D2, D3, F1, R1, R2, R3 y A 0,5 (marcados en rojo) como los que determinan el proceso cinético. Estos modelos están relacionados con procesos difusivos (D), avance de la interfase de reacción (R) y de nucleación (A), no lográndose discriminar entre ellos, lo que se reconoce como la inconsistencia del método de ajuste de las funciones.

Tabla 3- Resultados cinéticos de la degradación de la hemicelulosa en el bagazo de caña modificado con hidróxido de sodio

Modelos	Hemicelulosa			
	Método de Coats		Método de Achar	
	R	Ea	R	Ea
D1	0.96	194	0.98	174
D2	0.96	201	0.98	198
D3	0.97	209	0.98	198
D4	0.96	204	0.82	55
F1	0.97	104	0.95	97
R1	0.95	93	0.99	72
R2	0.96	98	0.98	85
R3	0.97	101	0.97	89
A0.5	0.95	192	0.98	210
A1	0.87	79	0.95	97
A2	0.43	23	0.77	41
A3	0.02	4	0.48	22
A4	0.02	4	0.23	13

Esta dificultad para escoger un modelo cinético único en esta etapa de descomposición de la hemicelulosa, fue reportada en otros trabajos, donde se estudió la cinética de la descomposición

pirolítica del bagazo de caña sin modificar y de maderas ecuatorianas.⁽²²⁾ Esto está atribuido a que, simultáneamente a la desvolatilización de la hemicelulosa, como constituyente más inestable térmicamente de la biomasa, se empieza a descomponer en menor proporción fragmentos más volátiles de la lignina.

Otros autores⁽⁴⁾ han simulado teóricamente estos procesos de descomposición pirolítica de los principales constituyentes de la biomasa por separado y han propuesto intervalos para la lignina entre (200-700 °C); sin descartar, que pueda iniciarse también el proceso de descomposición de la celulosa, así como otras reacciones que ocurren al margen de la desvolatilización de los constituyentes principales. Esta diversidad de reacciones químicas transcurre a través de modelos cinéticos diferentes y hacen de esta primera etapa, la más compleja.

El intervalo de energía de activación calculado para esta etapa está entre 72-210 kJ/mol, el que se encuentra en el rango energético propuesto por otros autores.^(21,22)

En la tabla 4 se presentan los resultados cinéticos de la degradación de la celulosa y la lignina, los que se discutirán juntos por la similitud entre ellos.

Tabla 4. Resultados cinéticos de la degradación de la celulosa y lignina en el bagazo de caña modificado con hidróxido de sodio.

Modelos	Celulosa				Lignina				
	M. Coats		M Achar		M. Coats		M Achar		
	R	Ea	R	Ea	M	R	Ea	R	Ea
D1	0.84	731	0.84	359	D1	0.81	119	0.74	54
D2	0.88	840	0.94	529	D2	0.85	135	0.93	86
D3	0.92	957	0.97	73	D3	0.91	157	0.96	129
D4	0.90	861	0.76	346	D4	0.87	142	0.64	69
F1	0.94	531	0.83	368	F1	0.92	83	0.73	69
R1	0.84	360	0.93	12	R1	0.76	52	0.44	13
R2	0.90	438	0.82	177	R2	0.86	65	0.65	28
R3	0.92	472	0.82	241	R3	0.88	71	0.70	42
A0.5	0.77	679	0.96	924	A0.5	0.66	99	0.93	169
A1	0.87	463	0.83	367	A1	0.01	0.2	0.73	69
A2	0.28	134	0.20	110	A2	0.48	49.1	0.16	21
A3	0.58	224	0.03	20	A3	0.63	65	0.005	4
A4	0.68	270	0.03	25	A4	0.69	74	4.77	4

Para ambas etapas, tanto por Coats como por Achar, se identifican varios modelos probables (marcados en negrita), pero solo dos de ellos D2 y D3 (marcados en rojo) son los que determinan la velocidad de reacción, porque se repiten entre

los probables por ambos métodos. El menor número de modelos cinéticos seleccionados demuestra su menor complejidad cinética. Los valores de energía de activación calculados para ambas etapas son: 529-957 kJ/mol para la degradación de la celulosa y 86-157 kJ/mol para la degradación de la lignina. Estos son similares a los reportados por otros autores.^(21,22)

El estudio cinético realizado permite generalizar los siguientes aspectos:

- Es válida la metodología de cálculo utilizada, sobre todo para la cinética de celulosa y lignina, porque ayuda a identificar un menor número de modelos.
- Se demuestra la complejidad cinética del craqueo pirolítico de la biomasa, la dificultad de identificar un único modelo cinético y el error de suponer *a priori* que F1 (reacción de orden 1), como la única etapa que determina la cinética de la reacción.
- Los valores de energía de activación para las tres etapas de degradación de los constituyentes principales, son similares a lo reportado por otros autores.

Caracterización del carbón por microscopía óptica

Las figuras 3 A, B y C muestran las imágenes obtenidas al visualizar las biomazas estudiadas, utilizando un microscopio óptico. Las mismas, además de permitir caracterizar la morfología de las partículas, se aprovechan para mostrar la ocurrencia del proceso pirolítico.

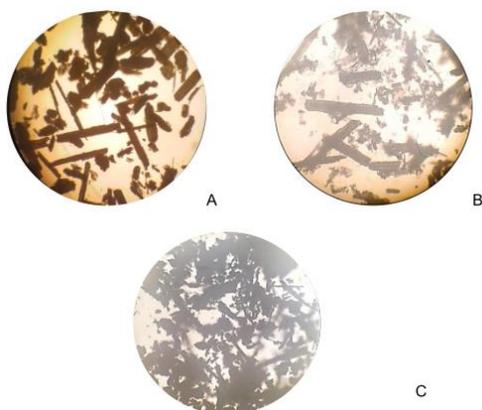


Fig. 3. Microscopía óptica. Bagazo de caña sin modificar (A), Bagazo impregnado con NaOH (B), Bagazo de caña pirolizado previa impregnación con NaOH (C).

El bagazo de caña sin modificar (figura 3 A) presenta partículas de diferentes tamaños, generalmente alargadas en una dirección, que

recuerdan las microfibras de la biomasa. En el bagazo modificado con NaOH (figura 3 B) no se observan cambios significativos en la superficie de las partículas y en el pirolizado previa activación con NaOH, en general, disminuyen las partículas más largas, lo que es un indicio de la ocurrencia del craqueo pirolítico de la biomasa.

Caracterización eléctrica preliminar

Dada la posible aplicación de estos materiales carbonosos como electrodos en bioceldas de combustible, es interesante precisar su conductividad eléctrica. Con estos fines se presenta, la dependencia del cociente de la resistividad/densidad másica (ρ/ρ_m) en función de la presión de compactación del polvo en el momento de la medición, para el bagazo de caña de azúcar pirolizado previa impregnación con NaOH (figura 4). Se comparan los resultados obtenidos con un carbón activado comercial.⁽¹⁷⁾

A presiones bajas dentro del intervalo estudiado, la caída del cociente de la resistividad/densidad másica (ρ/ρ_m) es brusca porque se mejora el contacto intergranular, la densidad másica aumenta y la resistividad disminuye. Posteriormente se observa cierto comportamiento asintótico más relacionado con el comportamiento de las partículas del polvo ante el aumento de la presión.

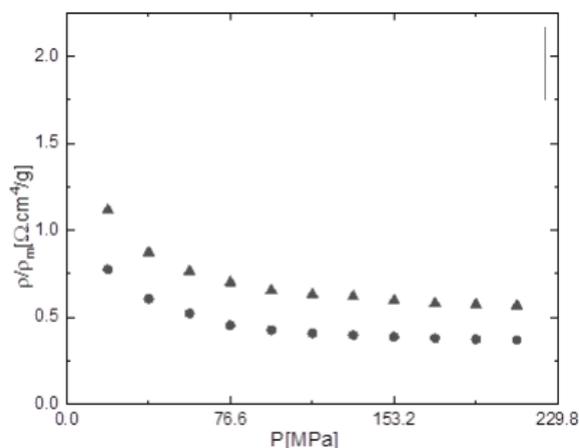


Fig. 4. Dependencia del cociente de la resistividad/densidad másica (ρ/ρ_m) en función de la presión de compactación del polvo, para el bagazo de caña de azúcar pirolizado previa impregnación con NaOH ▲ y Carbón Comercial ●

El valor del cociente (ρ/ρ_m) para el bagazo activado con hidróxido de sodio fue de 1,2 $\Omega.cm^2/g$, y demuestra la efectividad del proceso de activación realizado, porque los chars

presentan valores del mismo muy superiores.⁽¹⁷⁾ Además, el carbón activado obtenido tiene mejor conductividad que el bagazo sin modificar, por lo que preliminarmente es un buen candidato como electrodo para celdas de biocombustible. La aparición de sodio metálico entre los planos grafiticos, por reducción del NaOH a Na₂O, y luego a Na metálico, según mecanismo propuesto Almansa,⁽¹¹⁾ puede explicar su mejor conductividad.

CONCLUSIONES

Los análisis inmediato y elemental, demostraron la composición del bagazo de caña modificado con hidróxido de sodio. Se expone la menor influencia de la activación con hidróxido de sodio en el perfil térmico, y se explica por la menor interacción del mismo con la biomasa, según los mecanismos propuestos por otros autores. Se precisaron los parámetros cinéticos que determinan el craqueo pirolítico del bagazo de caña modificado con NaOH, demostrando en general la complejidad cinética del proceso estudiado y el error de presuponer *a priori*, que el modelo F1 es el que determina la velocidad de reacción. Se demuestra y explica preliminarmente, la mejor conductividad del material carbonoso obtenido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- AMAR, P. “Empleo de catalizadores heterogéneos para el aprovechamiento de biomasa lignocelulósica mediante pirólisis”. Tesis de doctorado. Universidad nacional del sur. Argentina. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/1234/56789/2923>. Revisión: 5 mayo de 2022.
- 2- ASIMBAYA, C; ROSAS, N; ENDARA, D.; GUERRERO, V. H. “Obtención de carbón activado a partir de residuos lignocelulósicos de canelo, laurel y eucalipto”. *Revista Politécnica*, 2015, 36 (3): pp. 10-12. <https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revistapolitecnica2/article/view/537>. Revisión: 5 mayo de 2022.
- 3- ALBIS, A.; ORTIZ, E.; PIÑERES, I.; OSORIO, J.; MONSALVO, J. “Pirólisis de hemicelulosa catalizada por sulfato de zinc y sulfato férrico”. *Revista Ion*, 2018, 31(2): pp. 37-49. DOI: <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018003>.
- 4- DAMARTZIS, Th. *et al.* “Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynaracardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA)”. *Bioresource technology*, 2011, 102(10): pp. 6230-6238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.060>.
- 5- ALTAMIRANO HERNÁNDEZ, U. “Bagazo como alternativa de conservación de humedad en el campo cañero del ingenio la margarita, S.A de C.V.” Tesis de maestría. Facultad de Ciencias biológicas y agropecuarias. Universidad Veracruzana, México, 2020. URL: <https://cdigital.uv.mx/handle/1944/50305>. Revisión: 20 mayo de 2022.
- 6- GUIMARÃESA, J. L.; FROLLINI, E.; DA SILVA, C. G.; WYPYCHC, F.; SATYANARAYANAC, K. G. “Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil”. *Industrial Crops and Products*, (2009), 30: pp. 407–415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.013>.
- 7- ADINAVEEN, T.; VIJAYA, J.; KENNEDY, J. L. “Comparative study of electrical conductivity on activated carbons prepared from various cellulose materials”. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1516-6>.
- 8- KAZMIERCZAK RAZNA, J. *et al.* “Thermal and physicochemical properties of phosphorus-containing activated carbons obtained from biomass”. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 2017, 000: pp. 1-8 Article in press. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.09.015>
- 9- GUOA, Y.; TANA, CH.; SUNA, J.; LIA, W.; ZHANGA, J.; ZHAOA, CH. “Porous activated carbons derived from waste sugarcane bagasse for CO₂ adsorption”. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 381, 122736. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122736>
- 10- ACEVEDO, S.; GIRALDO, L.; MORENO PIRAJÁN, J. C. “Influencia de la temperatura de activación en las características superficiales de carbones activados granulares preparados por impregnación con MgCl₂ y CaCl₂”. *Afinidad LXXII*, 2015, 72(571): pp. 182-187, julio-septiembre. URL:

<https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/300830>. Revisión: 20 mayo de 2022

11- ALMANSA CARRASCOSA, M. C. “Preparación de discos de carbono activado químicamente para la almacenamiento de metano”. Tesis de doctorado. Universidad de Alicante. 2004. URL:

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=19692>. Revisión: 20 mayo de 2022

12- UNE-EN-14774-1. “Biocombustibles sólidos. Procedimiento para el secado de biomásas”. *Norma española*, septiembre 2010.

13- BAHÍN DERONCELÉ, L. J.; QUESADA GONZÁLEZ, O.; CASCARET CARMENATY, D. A.; ODIO GONZÁLEZ, R. A.; CANTOS MACÍAS, M. A. “Obtención de material carbonoso de bagazo de caña de azúcar con activación salina”. *Rev. Cubana Quím* 2023. 35 (2): pp. 253-273. e-ISSN: 2224-5421.

14- UNE-EN- 15148. “Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de materia volátil”. *Norma española*, septiembre 2010.

15- UNE-EN-14775. “Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido de cenizas”. *Norma española*, septiembre 2010.

16- PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. “A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials”. *Fuel*, 2007, 86 (12): pp. 1710-1719.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.028>.

17- MUNÉ BANDERA, P. M.; QUESADA GONZÁLEZ, O.; SERAT DÍAZ, M. “Materiales

carbonosos y diseño de celdas de biocombustible a partir de residuales de la industria azucarera”. Informe de avance del proyecto. *Programa Nacional de Nanociencias y Nanotecnología*, junio 2022.

18- SEBASTIÁN NOGUÉS, F.; GARCÍA GALINDO, D.; REZEAU, A. *Energía de la Biomasa*, vol. I. España, Prensa Universitaria de Zaragoza, 2010. ISBN 978-84-92774-91-3.

19- MACÍAS NARANJO, R. J.; CHEJNE JANNA, F.; MONTOYA ARBELÁEZ, J. I.; BLANCO LEAL, A. “Gasificación de bagazo de caña y carbón en planta piloto”. *Mutis*, 2014, 4 (1): pp. 24-32, enero-junio. <https://doi.org/10.21789/22561498.907>

20- CARDOSO, C. R.; MIRANDA, M. R.; SANTOS, K. G.; ATAÍDE, C. H. “Determination of kinetic parameters and analytical pyrolysis of tobacco waste and sorghum bagasse”. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 92: pp. 392-400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.07.013>

21- RUEDA ORDÓÑEZ, Y. J.; TANNOUS, K. “Análisis cinético de la descomposición térmica de biomásas aplicando un esquema de reacciones paralelas independientes”. *Revista UIS Ingenierías*, 2017, 16 (2): pp. 119-128. <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017011>

22- Cantos Macías, M. A. *et al.* “Cinética de la pirólisis de residuos madereros ecuatorianos”. *Revista Cubana de Química*, 2018, 30 (3): pp. 400-422. ISSN 2224-5421.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Dannis Adrian Cascaret-Carmenaty: Concepción de la investigación, realización de toda la parte experimental, discusión de los resultados.

Pedro Demetrio Muné Bandera: Concepción y puesta a punto del equipamiento para la medición eléctrica, realización de parte experimental durante la síntesis del carbón y las mediciones eléctricas y revisión del artículo.

Manuel A. Cantos Macías: Revisión bibliográfica del tema, confección de las hojas de cálculo en Origin y Excel para los cálculos cinéticos realizados y revisión de los mismos.

Omaida Quesada. Concepción de la investigación, realización de los cálculos cinéticos, discusión de los resultados, escritura y revisión del artículo.