DOI 10.37761/rsqp.v91i4.541

Recibido: 13.01.26
Aceptado: 23.03.26

CARBÓN ACTIVADO DERIVADO DE PLUMAS DE POLLO PARA SUPERCAPACITORES

Ofelia M. Arias-Pinedo[a], Gian Marcos Evangelista[a], Richard D. Chávez-Najarro[a], Vanessa Miguel-Calderon[a], Aracely Molina-Trujillo[a], Leyser Chapia-Calderón[b], Fernando Javier Hurtado Butrón[b], Vitor Leite. Martins[c], Angélica María Baena-Moncada[a*]

RESUMEN

El creciente consumo de combustibles fósiles ha intensificado la crisis ambiental y energética a nivel mundial. En este contexto, el desarrollo de tecnologías avanzadas de almacenamiento de energía ha adquirido una relevancia estratégica, siendo los supercapacitores una opción prometedora debido a su alta densidad de potencia, rápidas cinéticas de carga y descarga, y sobresaliente estabilidad cíclica. En este estudio se reporta la síntesis y evaluación electroquímica de carbón activado (CA) obtenido a partir de plumas de pollo (PP), un residuo agroindustrial abundante y rico en queratina, mediante activación química con KOH y carbonización controlada. La caracterización estructural y morfológica se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y espectroscopía Raman, mientras que las propiedades texturales se evaluaron a partir de isotermas de adsorción–desorción de N_2. El desempeño electroquímico fue investigado mediante voltamperometría cíclica (CV). Los resultados muestran que la pre-carbonización a 230 °C, junto con una relación biomasa: activante de 1:1, conduce a un material con un área superficial específica de hasta 1873 $m^2\ g^{-1}$ y una red de poros jerárquica, alcanzando una capacitancia específica de hasta 137 $F\ g^{-1}$ a 5 $mV\ s^{-1}$ en KOH 0,1 mol L^{-1}, lo que evidencia su potencial para aplicaciones en dispositivos sostenibles de almacenamiento de energía.

Palabras clave: Carbón activado; Plumas de pollo; Carbón derivado de biomasa; Supercapacitores; Almacenamiento electroquímico de energía

[a] Laboratorio de Investigación de Electroquímica Aplicada, Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Rímac, Lima, Perú. abaenam@uni.edu.pe

[b] Laboratorio Multidisciplinario de Nanociencia y Nanotecnología "Oswaldo Sánchez Rosales", del Departamento de Física, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo, Juan Pablo II Av., Trujillo 13008, Perú. GMIN-UNT.

[c] Depto. Química Fundamental, Instituto de Química, Universidade de São Paulo, Av. Prof. Lineu Prestes 748, 05508-000 São Paulo, SP, Brazil.

BIOMASS-DERIVED ACTIVATED CARBON FROM CHICKEN FEATHERS FOR SUPERCAPACITORS

ABSTRACT

The increasing consumption of fossil fuels has intensified the global environmental and energy crisis, driving the need for efficient and sustainable energy storage technologies. In this context, supercapacitors have emerged as promising devices due to their high-power density, fast charge–discharge kinetics, and excellent cycling stability. In this study, activated carbon (AC) was synthesized from chicken feathers (CF), an abundant agro-industrial waste rich in keratin, through chemical activation with KOH followed by controlled carbonization. The structural and morphological characteristics of the materials were investigated using scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and Raman spectroscopy, while the textural properties were evaluated by N_2 adsorption–desorption isotherms. The electrochemical performance was assessed by cyclic voltammetry (CV). The results demonstrate that pre-carbonization at 230 °C combined with a biomass-to-activating agent ratio of 1:1 leads to the formation of a hierarchically porous carbon material with a high specific surface area of up to 1873 $m^2\ g^{-1}$. The optimized sample delivered a maximum specific capacitance of 137 F g^{-1} at 5 mV s^{-1} in KOH 0.1 mol L^{-1}, highlighting its suitability for application in sustainable electrochemical energy storage devices. These findings confirm the potential of chicken feathers as a low-cost and environmentally friendly precursor for high-performance supercapacitor electrodes.

Key words: Activated carbon; Chicken feathers; Biomass-derived carbon; Supercapacitors; Electrochemical energy storage

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética y la fuerte dependencia de los combustibles fósiles han generado un impacto ambiental significativo, caracterizado por la emisión de gases de efecto invernadero y el acelerado agotamiento de los recursos naturales[1]. En este contexto, las energías renovables han emergido como alternativas viables; sin embargo, su naturaleza intermitente requiere el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energías eficientes, confiables y de alta estabilidad[2]. Entre las tecnologías de almacenamiento disponibles, los supercapacitores se destacan por su elevada densidad de potencia, rápidas cinéticas de carga y descarga, y sobresaliente vida útil [3]. No obstante, el desempeño global de estos dispositivos está fuertemente condicionado por las propiedades fisicoquímicas de los materiales empleados como electrodos, lo que ha impulsado la búsqueda de precursores económicos, sostenibles y con elevada capacidad de almacenamiento de carga.

En las últimas décadas se han investigado ampliamente diversos materiales de carbono para su uso como electrodos en supercapacitores, incluyendo el grafeno [4], nanopartículas de carbono, nanotubos de carbono [5], óxido de grafeno reducido [6] y carbones porosos [7]. Sin embargo, a pesar de sus ventajas estructurales, muchos de estos materiales presentan limitaciones en densidad de energía, asociadas a áreas superficiales insuficientes o a una porosidad poco accesible [8]. En este sentido, la síntesis de carbón activado (CA) a partir

de biomasa resulta particularmente atractiva debido a la amplia disponibilidad de precursores, su bajo costo y la simplicidad del proceso de obtención. Adicionalmente, estos materiales presentan elevada estabilidad química y térmica, lo que los posiciona como candidatos prometedores para aplicaciones en supercapacitores [9].

Diversos estudios han reportado la obtención de CA a partir de residuos vegetales empleando distintos agentes activantes. Por ejemplo, para la planta *Convolvulus arvensis* se utiliza $NaHCO_3$, en una relación biomasa:activante de 1:4, obteniéndose un material con un área superficial de 680 $m^2\ g^{-1}$ y una capacitancia específica de 223 F g^{-1} a 0,1 A g^{-1} en KOH 6,0 mol L^{-1} [10]. En el caso de residuos de hojas de *Mangifera indica*, la activación con KOH en una relación 1:1 permitió alcanzar áreas superficiales de hasta 1232,6 $m^2\ g^{-1}$ y capacitancias específicas de 521,6 F g^{-1} a 0,5 A g^{-1}, destacándose la temperatura como un factor clave en el desarrollo de la porosidad [11]. De manera similar, en residuos de yerba mate activados con KOH en diferentes relaciones biomasa:activante (1:1, 1:3 y 1:6), se obtuvieron áreas superficiales entre 20,2 y 1820,9 $m^2\ g^{-1}$, evidenciando que no existe una relación lineal directa entre la cantidad de agente activante y el área BET, siendo el material óptimo aquel que alcanzó una capacitancia específica de 137,0 F g^{-1} a 1,0 A g^{-1} en KOH 3,0 mol L^{-1} [12]. Sin embargo, a pesar de los avances reportados, aún persiste el desafío de desarrollar carbones activados derivados de biomasa que combinen simultáneamente una elevada área superficial, una porosidad jerárquica adecuadamente distribuida y una buena retención capacitiva a altas velocidades de barrido, factores clave para aplicaciones prácticas en supercapacitores.

En este trabajo, la valorización de plumas de pollo, un subproducto abundante de la industria avícola y una fuente rica en queratina, como precursor para la obtención de carbón activado, se plantea como una estrategia alineada con los principios de la economía circular y el desarrollo de materiales sostenibles para el almacenamiento electroquímico de energía.

PARTE EXPERIMENTAL

Preparación del Carbón Activado

Las plumas de pollo blancas (PP) fueron recolectadas en el mercado de Puente Piedra, Lima, Perú. Inicialmente, las muestras fueron lavadas mediante ebullición en agua ultrapura con el fin de eliminar impurezas, y posteriormente secadas a 60 °C durante 48 h. Una vez secas, las plumas fueron trituradas y sometidas a un tratamiento térmico previo a 230 °C durante 1 h. Posteriormente, el material pre-carbonizado se impregnó con KOH (P.A., Sigma-Aldrich) en relaciones PPpre:KOH de 1:1, 1:2 y 1:3, seguido de un proceso de pirólisis a 700 y 800 °C bajo atmósfera de N_2, con una velocidad de calentamiento de 5 °C min^{-1} y un tiempo de permanencia de 1 h. Finalmente, los materiales obtenidos fueron lavados repetidamente con agua ultrapura hasta alcanzar un pH cercano a 7. En la Figura 1 se presenta un esquema representativo del proceso de síntesis de los materiales carbonosos.

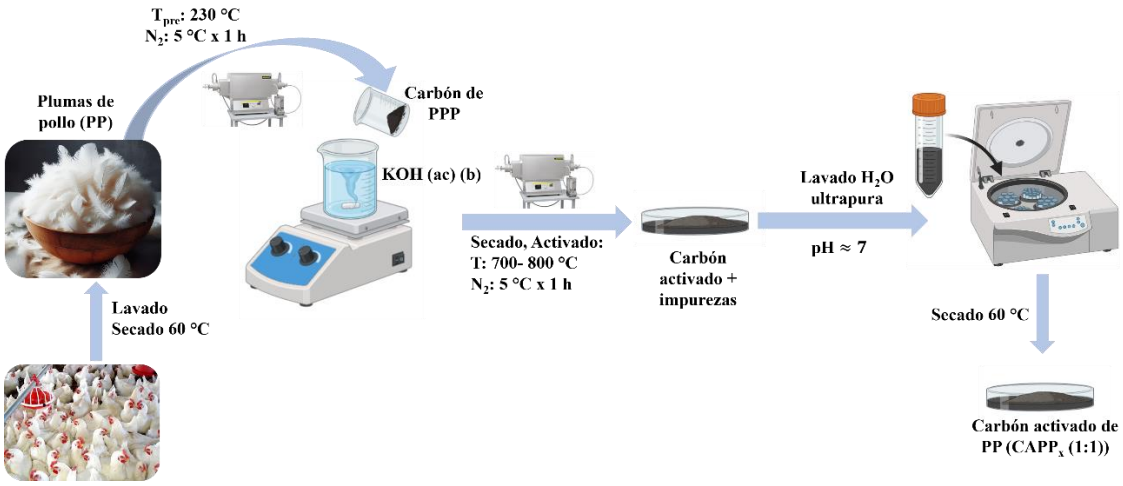


Figura 1. Proceso de obtención del carbón activado derivado de las plumas de pollo (CAPP).

Caracterización fisicoquímica

Para el análisis de la morfología de los materiales carbonosos se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un equipo JEOL JCM-5000. La caracterización por espectroscopía infrarroja se realizó con un espectrómetro FTIR PerkinElmer, con el fin de identificar los principales grupos funcionales superficiales presentes en los carbones activados.

La espectroscopía Raman, utilizada para evaluar el grado de orden estructural y la densidad de defectos, se llevó a cabo empleando un equipo Raman confocal Alpha 300 con láser de excitación de 532 nm. La deconvolución de las bandas D y G se efectuó mediante ajuste Lorentziano, permitiendo una evaluación cuantitativa del desorden estructural.

La textura porosa de los materiales se estudió mediante isotermas de adsorción–desorción de N_2, obtenidas con un equipo Anton Paar Nova 800. El área superficial específica se calculó utilizando el método BET (Brunauer–Emmett–Teller), mientras que la microporosidad se determinó mediante el método t-plot.

Caracterización electroquímica de los carbones activados

Para la preparación de los electrodos, los materiales carbonosos fueron pulverizados en un mortero de ágata hasta obtener un polvo homogéneo. Posteriormente, se pesaron 2 mg de cada material, los cuales se dispersaron en 500 µL de agua ultrapura y 20 µL de Nafion^{TM} 117, actuando este último como aglutinante. De esta suspensión, se tomaron 10 µL y se depositaron sobre un electrodo de carbón vítreo de 3 mm de diámetro. Como contraelectrodo se utilizó una barra de grafito de 5 mm de diámetro, mientras que como electrodo de referencia se empleó un electrodo Ag/AgCl (KCl 3,0 mol L^{-1}). El electrolito utilizado fue KOH 1,0 mol L^{-1}. La configuración de tres electrodos fue empleada con el objetivo de evaluar el comportamiento electroquímico intrínseco de los materiales carbonosos, minimizando efectos asociados a limitaciones del contraelectrodo o a la configuración del dispositivo. Las mediciones electroquímicas se realizaron en una ventana de potencial de −0,4 a 0,6 V, a diferentes velocidades de barrido comprendidas entre 5 y 250 mV s^{-1}, dentro de una región de trabajo estable sin contribuciones faradaicas significativas. Todas las mediciones se llevaron a cabo empleando un potenciostato–

galvanostato Autolab PGSTAT30, controlado mediante el software NOVA 2.1.3. La capacitancia específica fue calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$C_s = \frac{\int_0^{2V_0/\nu} |i| dt}{2mV_0} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:
ν es la velocidad de barrido, V_0 es la diferencia de voltaje, *i* es la corriente y m es la masa del material.
Se realizaron mediciones por triplicado (n=3) para todos los materiales y condiciones evaluadas. Los valores reportados en este trabajo corresponden al promedio aritmético de estas tres mediciones independientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización morfológica y estructural

En la Figura 2 se muestran las micrografías SEM correspondientes al material $CAPP_{700}$ (1:1) a diferentes aumentos. A mayor escala (Figura 2a, 10 µm), el material presenta una morfología heterogénea y rugosa, con cavidades irregulares distribuidas a lo largo de la superficie, lo que sugiere una descomposición térmica efectiva del precursor y la generación de una estructura porosa interconectada. Esta morfología favorece la accesibilidad del electrolito y actúa como vía de transporte para los iones hacia regiones de menor escala porosa. A una escala de 1 µm (Figura 2b) se observa claramente una estructura porosa, lo que sugiere una activación química efectiva del material mediante KOH, favoreciendo el desarrollo de poros accesibles para la difusión iónica [13].

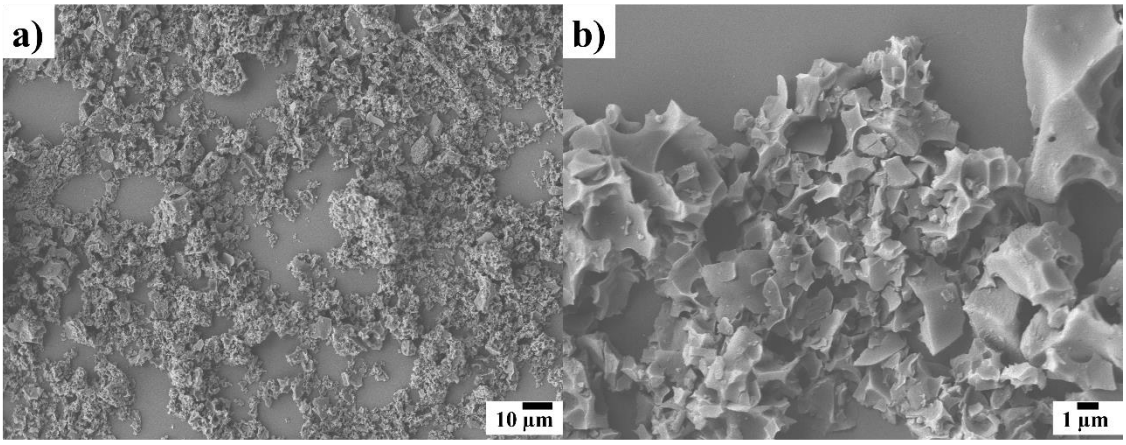


Figura 2. Imágenes SEM para $CAPP_{700}$ (1:1) a) 10 µm (x 600) y b) 1µm (x 5 000).

El espectro FTIR de las muestras $CAPP_{700}$ (1:1) y $CAPP_{800}$ (1:1), presentado en la Figura 3, muestra una banda ancha alrededor de 3740 cm^{-1}, atribuida al estiramiento del grupo –OH, asociado principalmente a agua adsorbida o grupos hidroxilo superficiales. Las bandas observadas en 2384 y 2326 cm^{-1} corresponden al estiramiento asimétrico del CO_2, probablemente adsorbido en los poros del carbón o presente en el ambiente.
Las señales en 2112 y 2088 cm^{-1} pueden asociarse al estiramiento de enlaces C≡C o C≡N, mientras que la banda en 1510 cm^{-1} se relaciona con el estiramiento C=C de estructuras aromáticas. Las bandas ubicadas en 1232 y 1022 cm^{-1} se atribuyen al estiramiento C–O,

indicando la presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie del carbón. Finalmente, la banda en 903 cm^{-1} corresponde a la deformación fuera del plano del enlace C–H en anillos aromáticos [14], confirmando la naturaleza carbonosa del material.

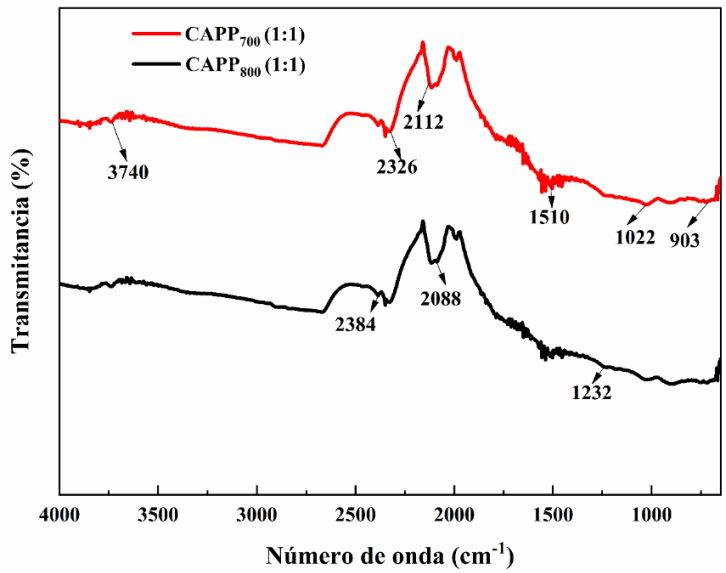


Figura 3. Espectro FTIR para los carbones activados.

La espectroscopía Raman fue empleada para evaluar el grado de orden estructural de los carbones activados en función de la temperatura de carbonización. Como se observa en la Figura 4, ambos materiales presentan una banda D alrededor de 1340 cm^{-1}, asociada a defectos estructurales y carbonos sp^3, y una banda G alrededor de 1600 cm^{-1}, correspondiente a carbonos sp^2 en dominios grafíticos [15].

La relación de intensidades I_D / I_G fue de 1,86 para $CAPP_{700}$ (1:1) y 1,39 para $CAPP_{800}$ (1:1), lo que indica un mayor grado de desorden estructural en el material tratado a 700 °C. Este comportamiento sugiere que el incremento de la temperatura de carbonización favorece un reordenamiento parcial de la red carbonosa, en concordancia con la posible reducción de la microporosidad observada en el análisis textural.

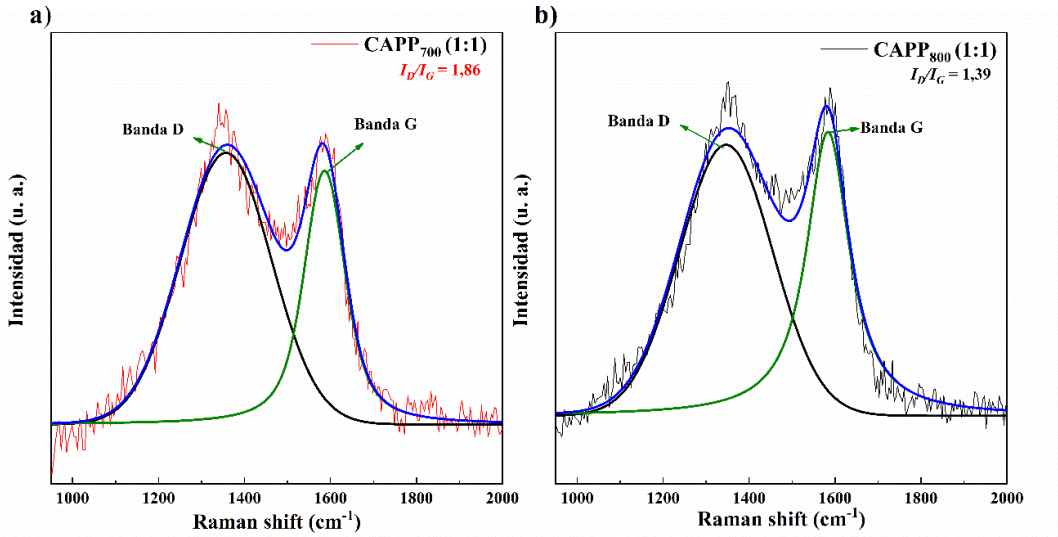


Figura 4. Deconvolución del espectro Raman para las muestras de $CAPP_{700}$ (1:1) y b) $CAPP_{800}$ (1:1).

Propiedades texturales

Las isotermas de adsorción–desorción de N_2 presentadas en la Figura 5 corresponden a una combinación de isotermas tipo I y IV, con un ciclo de histéresis tipo H4 débil pero discernible, lo que es característico de materiales que contienen una estructura jerárquica de poros, con predominancia de microporos y una contribución de mesoporos [16]. Esta combinación es altamente deseable para electrodos de supercapacitores [14, 17]. El área superficial BET obtenida es de 650 $m^2 g^{-1}$ para $CAPP_{700}$ (1:1) y 1870 $m^2 g^{-1}$ para $CAPP_{800}$ (1:1).

A pesar del incremento significativo del área superficial con la temperatura, la contribución de la microporosidad aumenta en 10 %. Para $CAPP_{700}$ (1:1) la menor microporosidad puede atribuirse a una activación incompleta o la formación de mayor cantidad de mesoporos y macroporos, mientras que para $CAPP_{800}$ (1:1) el aumento del área superficial puede deberse a una activación más efectiva a temperaturas más elevadas. Este resultado es consistente con los valores de I_D/I_G obtenidos por Raman, que indican un mayor orden estructural a 800 °C [13].

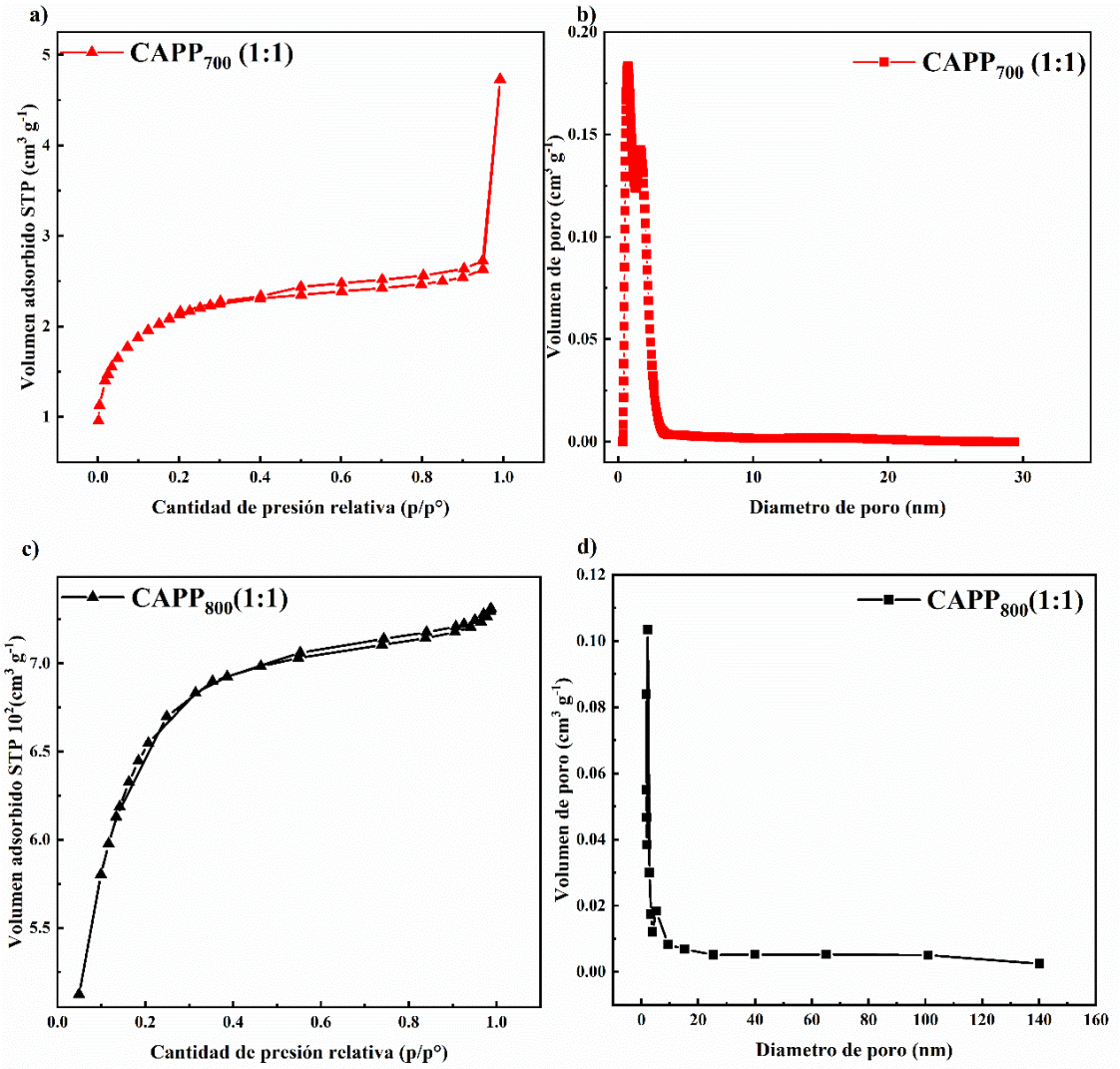


Figura 5. Adsorción/desorción de N_2 a) $CAPP_{700}$ (1:1) y c) $CAPP_{800}$ (1:1) y distribución de poro b) $CAPP_{700}$ (1:1) y d) $CAPP_{800}$ (1:1).

Tabla 1. Datos obtenidos por el ajuste BET y t-plot para las muestras de $CAPP_{700}$ (1:1) y $CAPP_{800}$ (1:1).

Muestra	S_{BET} ($m^2\ g^{-1}$)	S_{micro} ($m^2\ g^{-1}$)	microporosidad
$CAPP_{700}$ (1:1)	650	~ 460	~70 %
$CAPP_{800}$ (1:1)	1870	~ 1500	~80 %

Desempeño electroquímico

Las curvas de voltamperometría cíclica (VC) obtenidas para los diferentes materiales se muestran en la Figura 6. Los materiales carbonizados a 700 °C, en particular $CAPP_{700}$ (1:1), presentan mayores densidades de corriente a altas velocidades de barrido, en comparación con los materiales tratados a 800 °C. En todos los casos, se observa una ligera contribución faradaica en el intervalo de potencial comprendido entre 0,2–0,4 V, atribuida a la presencia de grupos funcionales superficiales.

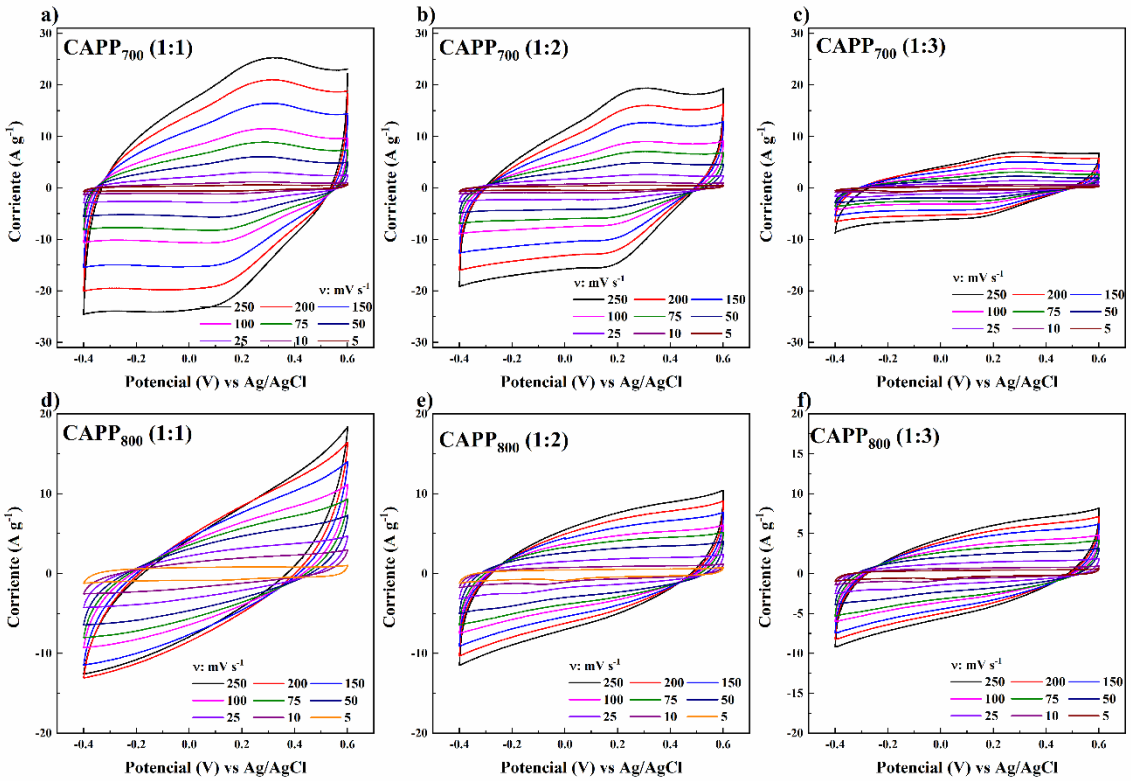


Figura 6. VC de los carbones activados a) $CAPP_{700}$ (1:1), b) $CAPP_{700}$ (1:2), c) $CAPP_{700}$ (1:3), d) $CAPP_{800}$ (1:1), e) $CAPP_{800}$ (1:2), f) $CAPP_{800}$ (1:3). Las medidas fueron realizadas en KOH 1,0 mol L^{-1}

La comparación de las VC a 5 mV s^{-1} (Figura 7) evidencia que los materiales tratados a 800 °C exhiben perfiles más rectangulares, característicos de un comportamiento tipo doble capa eléctrica (EDLC). La capacitancia específica, calculada a partir de la Ecuación 1 [18], alcanzan un valor máximo de 137 F g^{-1} para $CAPP_{800}$ (1:1) y 84 F g^{-1} para $CAPP_{700}$ (1:1) a 5 mV s^{-1}. Sin embargo, al incrementar la velocidad de barrido, la capacitancia de $CAPP_{800}$ (1:1) disminuye de manera más pronunciada, lo que se atribuye a limitaciones en la difusión iónica asociadas a su mayor fracción microporosa. En contraste, $CAPP_{700}$

(1:1) muestra una mejor retención de capacitancia a velocidades altas, alcanzando 67 F g^{-1} a 250 mV s^{-1} (Tabla 2) en comparación con $CAPP_{800}$ (1:1) con una capacitancia de 18 F g^{-1} a la misma velocidad. Este comportamiento evidencia la importancia de la mesoporosidad. Aunque $CAPP_{800}$ (1:1) posee un área superficial mucho mayor, su mayor fracción microporosa (~80%) restringe la difusión iónica a altas velocidades de barrido. En contraste, la menor área superficial de $CAPP_{700}$ (1:1) se compensa con una mayor proporción de mesoporos, que actúan como vías de acceso rápido que conectan la superficie externa con la microporosidad interna, resultando en una cinética iónica más favorable y una excelente retención de capacitancia [19].

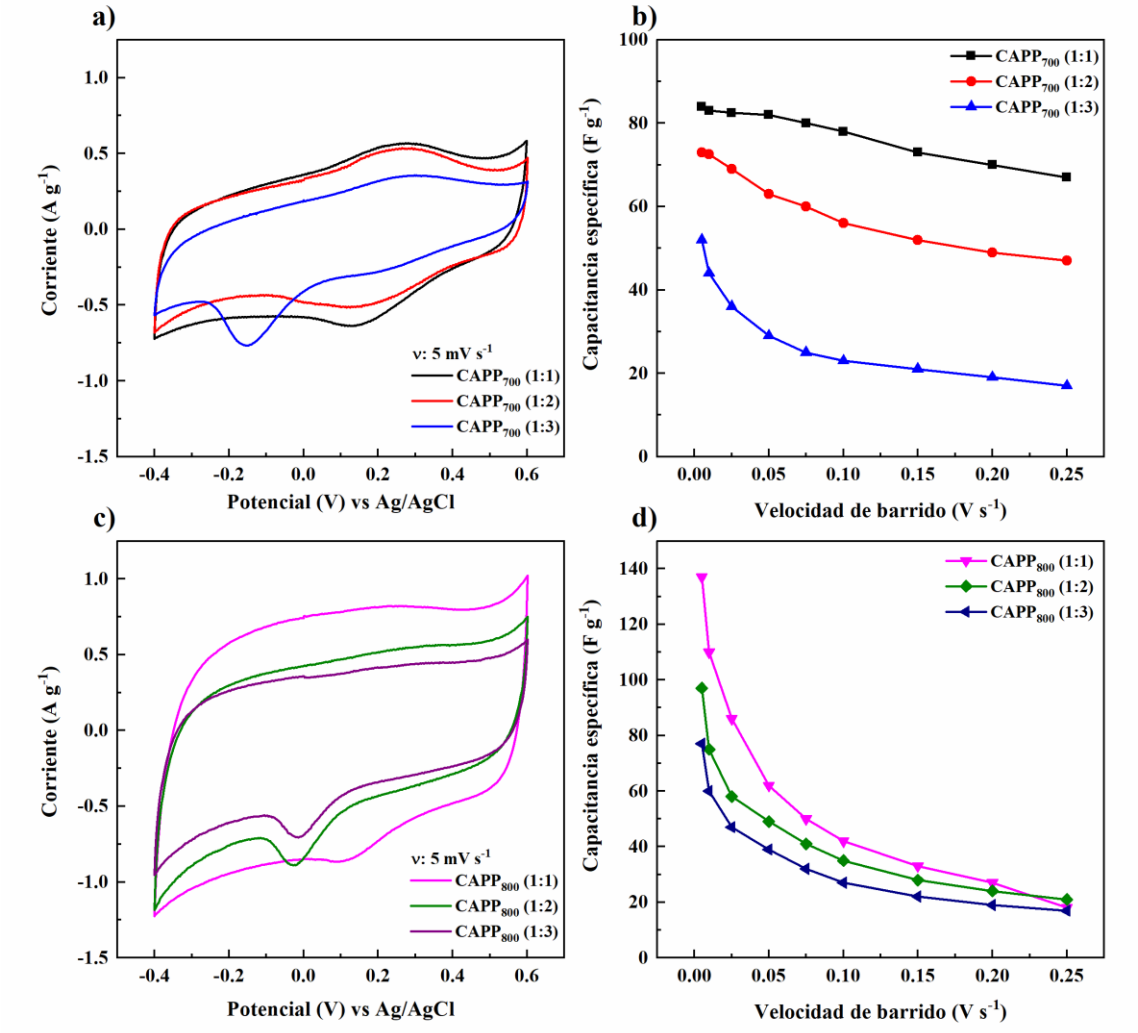


Figura 7. Comparación de las VC a 5 mV s^{-1} de los carbones activados en KOH 1,0 mol L^{-1} a) 700 °C, c) 800 °C y relación de la capacitancia específica b) 700 °C y d) 800 °C.

Tabla 2. Capacitancia específica $CAPP_{700}$ (1:1), (1:2), (1:3) y $CAPP_{800}$ (1:1), (1:2), (1:3).

Velocidad de barrido ($mV\ s^{-1}$)	Capacitancia específica ($F\ g^{-1}$)					
	$CAPP_{700}$ (1:1)	$CAPP_{700}$ (1:2)	$CAPP_{700}$ (1:3)	$CAPP_{800}$ (1:1)	$CAPP_{800}$ (1:2)	$CAPP_{800}$ (1:3)
5	84	73	52	137	97	77
10	83	72	44	110	75	60
25	82	69	36	86	58	47
50	82	63	29	62	49	39
75	80	60	25	50	41	32
100	78	56	23	42	35	27
150	73	52	21	33	28	22
200	70	49	19	27	24	19
250	67	47	17	18	21	17

Según la literatura, los supercapacitores funcionan de manera similar a los capacitores convencionales. Debido a que sus electrodos poseen una superficie específica muy elevada, los supercapacitores presentan una capacitancia mayor ($F\ g^{-1}$, $F\ cm^{-2}$) que los capacitores tradicionales [20]. Los valores de capacitancia específica alcanzados, en particular los 137 $F\ g^{-1}$ para CAPP800 (1:1) a bajas velocidades de barrido, son competitivos con otros carbones activados derivados de biomasa reportados en la literatura [10, 11, 12], lo que valida su potencial aplicación en dispositivos de almacenamiento de energía.

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el comportamiento electroquímico de carbones activados obtenidos a partir de plumas de pollo mediante activación química con KOH, variando la relación biomasa:activante y la temperatura de carbonización. Los resultados demuestran que las plumas de pollo constituyen un precursor biomásico viable para la obtención de materiales carbonosos con alta área superficial y porosidad jerárquica.

Se observó que la temperatura de carbonización y la cantidad de agente activante influyen de manera significativa en la textura porosa, el grado de orden estructural y el desempeño electroquímico. Si bien los materiales obtenidos a 800 °C presentan mayores áreas superficiales, los carbones carbonizados a 700 °C muestran una mejor estabilidad capacitativa a altas velocidades de barrido, atribuida a una mayor accesibilidad iónica.

Estos resultados resaltan la importancia de optimizar simultáneamente la estructura porosa y la cinética de transporte iónico, con el fin de desarrollar electrodos eficientes y sostenibles para aplicaciones en supercapacitores.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería por el apoyo con el código de proyecto FC-PFR-01-2024. Así como a la Universidad de Sao Paulo por el uso de equipos de SEM y medidas de adsorción y desorción de N_2, a la Universidad de Trujillo por el uso del Raman, y al Grupo de Investigación GISMA-UNI. Ofelia M. Arias-Pinedo Agradece a él CONCYTEC y

PROCIENCIA en el marco de los Concursos E077-2023-01-BM 'Becas en Programas de Doctorado en Alianzas Interinstitucionales' N.° PE501089001-20 24 y E033-2023-01-BM 'Alianzas Interinstitucionales para Programas de Doctorado' (PE501084300-2023-PROCIENCIA-BM)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J. R. Rajabathar, M. Sivachidambaram, J. J. Vijaya, H. A. Al-Lohedan, and D. M. D. Aldhayan, "Flexible type symmetric supercapacitor electrode fabrication using phosphoric acid-activated carbon nanomaterials derived from cow dung for renewable energy applications," *ACS Omega*, vol. 5, no. 25, pp. 15028–15038, 2020.
2. Q. Pan, D. Gong, and Y. Tang, "Recent progress and perspective on electrolytes for sodium/potassium-based devices," *Energy Storage Mater.*, vol. 31, pp. 328–343, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.ENSM.2020.06.025.
3. R. Boddula, A. Khan, A. M. Asiri, and A. E. Kolosov, "Handbook of Supercapacitor Materials: Synthesis, Characterization, and Applications," *Handbook of Supercapacitor Materials: Synthesis, Characterization, and Applications*, pp. 1–332, Jan. 2021, doi: 10.1002/9783527824779;WEBSITE:WEBSITE:PERICLES;ISPURCHASABLE:BOOLEAN:TRUE;PAGE:STRING:BOOK.
4. J. Lian *et al.*, "Design of hierarchical and mesoporous FeF3/rGO hybrids as cathodes for superior lithium-ion batteries," *Chinese Chemical Letters*, vol. 33, no. 8, pp. 3931–3935, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.CCLET.2021.12.014.
5. A. Khan, R. A. Senthil, J. Pan, S. Osman, Y. Sun, and X. Shu, "A new biomass derived rod-like porous carbon from tea-waste as inexpensive and sustainable energy material for advanced supercapacitor application," *Electrochim. Acta*, vol. 335, p. 135588, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.ELECTACTA.2019.135588.
6. P. M. Anjana, J. F. Joe Sherin, C. Vijayakumar, S. R. Sarath Kumar, M. R. Bindhu, and R. B. Rakhi, "Role of reduced graphene oxide-co-double-doped Fe3O4 nanocomposites for photocatalytic and supercapacitor applications," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 290, p. 116313, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.MSEB.2023.116313.
7. Y. Guo *et al.*, "Regulating adsorption ability toward polysulfides in a porous carbon/Cu3P hybrid for an ultrastable high-temperature lithium–sulfur battery," *Carbon Energy*, vol. 3, no. 6, pp. 841–855, Nov. 2021, doi: 10.1002/CEY2.145;CTYPE:STRING:JOURNAL.
8. A. Jain, M. Ghosh, M. Krajewski, S. Kurungot, and M. Michalska, "Biomass-derived activated carbon material from native European deciduous trees as an inexpensive and sustainable energy material for supercapacitor application," *J. Energy Storage*, vol. 34, p. 102178, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.EST.2020.102178.
9. J. Serafin *et al.*, "Direct conversion of biomass to nanoporous activated biocarbons for high CO2 adsorption and supercapacitor applications," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 497, p. 143722, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.APSUSC.2019.143722.
10. T. Ahmad *et al.*, "Preparation and electrochemical performance of Convolvulus arvensis-derived activated carbon for symmetric supercapacitors," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 292, p. 116430, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.MSEB.2023.116430.

11. S. S. Hegde and B. R. Bhat, "Sustainable energy storage: Mangifera indica leaf waste-derived activated carbon for long-life, high-performance supercapacitors," *RSC Adv.*, vol. 14, no. 12, pp. 8028–8038, Mar. 2024, doi: 10.1039/D3RA08910J.
12. F. Jerez, P. B. Ramos, V. E. Córdoba, M. F. Ponce, G. G. Acosta, and M. A. Bavio, "Yerba mate: From waste to activated carbon for supercapacitors," *J. Environ. Manage.*, vol. 330, p. 117158, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2022.117158.
13. E. Huarote-Garcia *et al.*, "Activated Carbon Electrodes for Supercapacitors from Purple Corncob (Zea mays L.)," *ACS Environmental Au*, vol. 4, no. 2, pp. 80–88, Mar. 2024, doi: 10.1021/ACSENVIRONAU.3C00048/ASSET/IMAGES/LARGE/VG3C00048_0007.JPEG.
14. M. I. Alarcón-Arroyo *et al.*, "High-performance supercapacitor electrodes based on alpaca manure-derived porous carbons," *Electrochim. Acta*, vol. 546, p. 147812, Jan. 2026, doi: 10.1016/J.ELECTACTA.2025.147812.
15. M. W. Smith *et al.*, "Structural analysis of char by Raman spectroscopy: Improving band assignments through computational calculations from first principles," *Carbon N. Y.*, vol. 100, pp. 678–692, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.CARBON.2016.01.031.
16. Z. N. Garba and A. A. Rahim, "Process optimization of K2C2O4-activated carbon from Prosopis africana seed hulls using response surface methodology," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 107, pp. 306–312, May 2014, doi: 10.1016/j.jaap.2014.03.016.
17. A. A. Cardenas-Riojas, A. P. Gualdron-Plata, E. Pastor, V. L. Martins, and A. M. Baena-Moncada, "Electrochemical performance of electrochemical capacitors prepared with activated carbons from sugarcane bagasse," *New Journal of Chemistry*, 2026, doi: 10.1039/d5nj04251h.
18. O. M. Arias-Pinedo *et al.*, "Cotton pads-derived carbon materials/reduced graphene oxide modified with polypyrrole for electrode of supercapacitors," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 94, pp. 41–53, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.JECHEM.2024.02.025.
19. Y. Lv *et al.*, "A comprehensive study on KOH activation of ordered mesoporous carbons and their supercapacitor application," *J. Mater. Chem.*, vol. 22, no. 1, pp. 93–99, Dec. 2011, doi: 10.1039/c1jm12742j.
20. B. Arumugam, G. Mayakrishnan, S. K. Subburayan Manickavasagam, S. C. Kim, and R. Vanaraj, "An Overview of Active Electrode Materials for the Efficient High-Performance Supercapacitor Application," *Crystals 2023, Vol. 13,* vol. 13, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/cryst13071118.