

**Desarrollo de materiales carbonosos  
obtenidos por transformación termoquímica  
de residuos industriales para la producción  
de agua dulce a partir de la  
deshumidificación del aire**

**Dahiana Galeano Caro  
2024**



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Desarrollo de Materiales Carbonosos Obtenidos por Transformación Termoquímica de Residuos Industriales para la Producción de Agua Dulce a partir de la Deshumidificación del Aire**

**Dahiana Galeano Caro**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de minas, Departamento de procesos y energía  
Medellín, Colombia  
2024

# **Desarrollo de materiales carbonosos obtenidos por transformación termoquímica de residuos industriales para la producción de agua dulce a partir de la deshumidificación del aire**

**Dahiana Galeano Caro**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Ingeniería Química**

Director:  
Ph.D. Farid B. Cortés

Línea de Investigación:  
Fenómenos de Superficie

Grupo de Investigación:  
Grupo de investigación en Fenómenos de Superficie-Michael Polanyi

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de minas, Departamento de procesos y energía  
Medellín, Colombia  
2024

*Agradezco enormemente a las personas que me acompañaron en este camino, a Dios, mi familia, al profesor Farid Cortés y al grupo de investigación en fenómenos de superficie Michael Polanyi.*

# Agradecimientos

Agradezco inmensamente a mi director el profesor Farid B. Cortés, por su incondicional apoyo y las enseñanzas recibidas durante la realización de mi tesis de maestría. Al profesor Farid Chejne Janna y a la profesora Nancy Acelas Soto por su disposición y tiempo para la revisión minuciosa del documento.

También agradezco a As A. Ríos, Leidy V. Ortiz y los miembros del Grupo de Investigación en Fenómenos de Superficie – Michael Polanyi por todo el soporte brindado durante la ejecución de las pruebas experimentales.

Especial agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, al proyecto 49192 de "UN INNOVA": Convocatoria de proyectos para el fortalecimiento de la innovación en la universidad nacional de Colombia a partir del desarrollo de prototipos y experiencias piloto 2019-2021 (primera cohorte) y al proyecto 91393 de Minciencias por el apoyo logístico y financiero.

A mi esposo y a mi hija por motivarme y apoyarme día a día, a mi familia y a mis amigos Steven, Laura y Óscar por siempre creer en mí.

A Dios por todas las bendiciones recibidas.

## Resumen

El agua potable es un recurso indispensable para la humanidad. Sin embargo, en zonas de alto estrés hídrico es difícil encontrarlo en condiciones adecuadas para su consumo y uso. Por ello, el principal objetivo de este estudio es la producción de agua dulce a partir de la deshumidificación del aire utilizando carbones activados obtenidos a partir de residuos industriales para hacer frente a esta situación. Se sinterizaron carbones activados a partir de la transformación termoquímica de residuos de tereftalato de polietileno (PET) y su desempeño se comparó con carbones activados comerciales sintetizados a partir de residuos agroindustriales de café y coco. Adicionalmente, los carbones fueron modificados superficialmente con ácido nítrico para mejorar su afinidad por compuestos polares. Los materiales fueron caracterizados profundamente a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia de fotoemisión de rayos (XPS), espectroscopia Raman y adsorción de nitrógeno. Los resultados mostraron materiales con área superficial de hasta  $1313 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  para aquellos sin acidificación superficial. Mientras que, aquellos modificados superficialmente disminuyeron su área superficial hasta en un 65% para los materiales sintetizados a partir de residuos de café y coco, y del 5% para aquellos sintetizados a partir de residuos PET. La acidificación superficial de los carbones permitió la exhibición de múltiples grupos oxigenados y nitrogenados, lo cual maximizó la interacción con las moléculas de agua a través de la formación de puentes de hidrógeno. Las isothermas de adsorción de agua sobre los carbones activados a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  tuvieron un comportamiento Tipo IV según la clasificación de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), mientras que, para temperaturas de  $30$  y  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  se obtuvieron isothermas tipo I. La máxima capacidad adsortiva fue de  $1.55 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  para el material P800N (carbón activado carbonizado hasta una temperatura de  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  y modificado superficialmente con ácido nítrico) para una humedad relativa del 84% y una temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . El proceso se puede definir como espontáneo y exotérmico según las propiedades termodinámicas de la sorción. Para las pruebas de campo se diseñó un prototipo para evaluación en Medellín, Antioquía, Colombia. Durante la prueba de campo, la sorción/captura de agua se realizó durante la noche, mientras que la liberación y producción de agua se produjo durante el día con uso exclusivo de energía solar. La humedad relativa promedio durante la etapa de adsorción fue de 80%, mientras que la velocidad del viento fue de  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  y la temperatura fue de  $20.7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Durante la etapa de desorción la temperatura promedio fue de  $26.2 \text{ }^\circ\text{C}$ . La productividad del agua fue igual a  $0.9 \text{ g}$  de agua condensada por  $\text{g}$  de material seco. Estos resultados indican que los materiales sintetizados pueden producir agua de manera

eficiente en áreas desafiantes en el marco de una economía circular, contribuyendo a la sostenibilidad y el bienestar social en zonas con alta escases hídrica.

**Palabras clave:** Acidificación superficial, Adsorción, Carbones activados, PET, Producción de agua dulce.

# Development of Carbonaceous Materials Obtained by Thermochemical Transformation of Industrial Waste for Freshwater Production from Air Dehumidification

## Abstract

Access to drinking water is a vital necessity for humanity. However, finding water in suitable conditions for consumption and use is challenging, particularly in areas experiencing high-water stress. The primary objective of this study is to address this issue by producing fresh water through air dehumidification using activated carbons derived from industrial waste. Commercial activated carbons, synthesized from agro-industrial coffee and coconut waste, as well as activated carbons synthesized from the thermochemical transformation of polyethylene terephthalate (PET) waste, underwent thorough characterization through techniques such as scanning electron microscopy (SEM), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), Raman spectroscopy, and nitrogen. The results showed materials with a surface area of up to  $1313 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  for those without surface acidification. Meanwhile, those superficially modified decreased their surface area by up to 65% for materials synthesized from coffee and coconut waste and 5% for those synthesized from PET waste. The surface acidification of the coals allowed the display of multiple oxygenated and nitrogenous groups, which maximized the interaction with water molecules by forming hydrogen bonds. The water isotherms on the activated carbons at 20 °C had Type IV behavior according to the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) classification. In contrast, type I isotherms were obtained for 30 and 40 °C temperatures. The maximum adsorptive capacity was  $1.55 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  for the P800N material (activated carbon carbonized up to a temperature of 800 °C and surface modified with nitric acid) with a relative humidity of 84% and a temperature of 20 °C. The process can be defined as spontaneous and exothermic according to the thermodynamic properties of the sorption. For field tests, a prototype was designed for evaluation in Medellín, Antioquia, Colombia. During the field test, water sorption/capture occurred at night, while water release and production occurred during the day with the exclusive use of solar energy. The average relative humidity during the adsorption stage was 80%, while the wind speed was  $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  and the temperature was 20.7 °C. During the desorption stage, the average temperature was 26.2°C. The water productivity was equal to 0.9 g of condensed water per g of dry

material. These results indicate that the synthesized materials can efficiently produce water in challenging areas within the framework of a circular economy, contributing to sustainability and social well-being in areas with high water scarcity.

**Keywords: Activated carbons, Adsorption, Freshwater production, PET, Surface acidification.**

# Contenido

	Pág.
	<b>Resumen V</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>X</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XII</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>15</b>
<b>1. Síntesis y caracterización de carbones activados.....</b>	<b>18</b>
1.1. Metodología .....	18
1.1.1. Síntesis de carbones activados a partir de la transformación termoquímica de residuos PET .....	18
1.1.2. Caracterización de carbones activados .....	19
1.2. Resultados .....	20
<b>2. Isotermas de adsorción de agua.....</b>	<b>30</b>
2.1. Metodología .....	30
2.2. Resultados .....	32
2.2.1. Efecto de la materia prima.....	32
2.2.2. Efecto acidificación superficial.....	33
2.2.3. Efecto de la temperatura .....	36
<b>3. Parámetros termodinámicos .....</b>	<b>41</b>
3.1. Metodología .....	41
3.2. Resultados .....	41
<b>4. Producción de agua dulce en condiciones ambientales de Medellín, Antioquia</b>	<b>44</b>
4.1. Metodología .....	44
4.2. Resultados .....	46
<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>49</b>
5.1. Conclusiones.....	49
5.2. Recomendaciones.....	50
<b>Referencias.....</b>	<b>53</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Registro fotográfico del proceso de síntesis de los carbones activados a partir de residuos PET. 1) Residuos PET cortados y lavados, 2) Polímero resultante de la degradación y activación de los residuos PET con KOH y 3) Carbón activado producto de la pirolisis del polímero resultante de la degradación y activación de los residuos PET con KOH. ....	19
<b>Figura 2.</b> Imágenes SEM para los carbones activados a) P800, b) P800N, c) P600, d) P600N, e) ACCa, f) ACCaN, g) ACCc y h) ACCcN.....	21
<b>Figura 3.</b> Detalle de la morfología física de los carbones activados sintetizados a partir de residuos agroindustriales de café ACCa.....	22
<b>Figura 4.</b> Detalle de la morfología física de los carbones activados sintetizados a partir de residuos PET – P800.....	22
<b>Figura 5.</b> Espectros C <sub>1s</sub> de alta resolución del análisis XPS de los carbones activados sintetizados y los carbones activados comerciales. La curva negra representa la suma de las curvas deconvolucionadas del patrón XPS. ....	24
<b>Figura 6.</b> Espectros O <sub>1s</sub> de alta resolución del análisis XPS de los carbones activados sintetizados y los carbones activados comerciales. La curva negra representa la suma de las curvas deconvolucionadas del patrón XPS. ....	26
<b>Figura 7.</b> Espectros N <sub>1s</sub> de alta resolución del análisis XPS característico de los carbones activados modificados superficialmente con ácido nítrico. La curva azul representa la suma de las curvas deconvolucionadas del patrón XPS. ....	27
<b>Figura 8.</b> Espectros Raman de carbones activados comerciales y sintetizados.....	28
<b>Figura 9.</b> Esquema representativo del montaje experimental para llevar a cabo las pruebas de adsorción de agua sobre los carbones activados comerciales y sintetizados antes y después del proceso de modificación superficial con ácido nítrico. ....	31
<b>Figura 10.</b> Isotermas de adsorción de agua para los carbones activados sintetizados P800 (círculos), P600 (Triángulos), y los carbones activados comerciales ACCa (Cuadrado) y ACCc (Cuadrado equis). Las líneas continuas negras corresponden al modelamiento de las isotermas con el modelo propuesto por Talu y Meunier [26]. Nads corresponde a la cantidad de agua adsorbida (g·g <sup>-1</sup> ) y P corresponde a la presión de vapor (mbar) alcanzada en los microclimas. ....	33
<b>Figura 11.</b> Isotermas de adsorción de agua para los carbones activados sintetizados P800 (círculos), P600 (Triángulos), y los carbones activados comerciales ACCa (Cuadrado) y ACCc (Cuadrado equis). Sin acidificación superficial (azul claro) y acidificados superficialmente (azul aguamarina). Las líneas continuas negras corresponden al	

modelamiento de las isothermas con el modelo propuesto por Talu y Meunier [26]. Nads corresponde a la cantidad de agua adsorbida ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) y P corresponde a la presión de vapor (mbar) alcanzada en los microclimas. ....	34
<b>Figura 12.</b> a) Relación entre el parámetro H (mbar) y el porcentaje del pico asociado al enlace $-\text{COO}^-$ del análisis XPS y b) Relación entre la cantidad de grupos asociados al enlace $-\text{COO}^-$ del análisis XPS por el área disponible para la interacción y la cantidad adsorbida (Nads) tomada para una presión de 19.63 mbar y una temperatura fija de $20^\circ\text{C}$ . ....	35
<b>Figura 13.</b> Isothermas de adsorción de agua para los carbones activados a) P800, b) P800N, c) P600, d) P600N, e) ACCa, f) ACCaN, g) ACCc y h) ACCcN bajo temperaturas de $20^\circ\text{C}$ (marcadores azul aguamarina), $30^\circ\text{C}$ (marcadores amarillos) y $40^\circ\text{C}$ (marcadores rojos). Las líneas continuar negras corresponden al modelamiento de las isothermas con el modelo propuesto por Talu y Meunier [26]. Nads corresponde a la cantidad de agua adsorbida ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) y P corresponde a la presión de vapor (mbar) alcanzada en los microclimas. ....	38
<b>Figura 14.</b> a) Calor isostérico de sorción de agua y b) Relación entre el cambio en la energía libre de Gibbs y la cantidad de agua adsorbida para los carbones activados sintetizados y comerciales. ....	43
<b>Figura 15.</b> Representación del diseño y dimensiones del dispositivo de adsorción/desorción empleado durante la producción de agua bajo condiciones ambientales de Medellín, Antioquia. ....	45
<b>Figura 16.</b> Representación esquemática de las etapas de sorción (izquierda) y desorción (derecha) para la producción de agua dulce a partir de la deshumidificación del aire. ...	46
<b>Figura 17.</b> Condiciones ambientales durante las pruebas de campo con carbón activado P800N. ....	47
<b>Figura 18.</b> Total de agua desorbida según análisis termogravimétricos realizados para el carbón activado P800N durante 10 ciclos de adsorción/desorción a presión atmosférica y temperatura final de $120^\circ\text{C}$ en atmosfera de aire. ....	48
<b>Figura 19.</b> a) Montaje experimental equipo deshumidificador ubicado en el desierto de la Tatacoa, Colombia y b) Cinética de condensación de agua para humedades relativas entre 0.3 y 0.7. ....	51

## Lista de tablas

Pág.

<b>Tabla 1.</b> Propiedades superficiales de los carbones activados comerciales y sintetizados. ....	23
<b>Tabla 2.</b> Contribución de los enlaces típicos para el espectro $C_{1s}$ del análisis XPS para los carbones activados sintetizados (P800 y P600) y los carbones activados comerciales (ACCa y ACCc) antes y después del proceso de acidificación superficial. ....	25
<b>Tabla 3.</b> Contribución de los enlaces típicos para el espectro $O_{1s}$ del análisis XPS para los carbones activados sintetizados (P800 y P600) y los carbones activados comerciales (ACCa y ACCc) antes y después del proceso de acidificación superficial. ....	26
<b>Tabla 4.</b> Contribución de los enlaces típicos para el espectro $N_{1s}$ del análisis XPS para el carbón activado (P800N).....	27
<b>Tabla 5.</b> D1350, G1590 e $I_D/I_G$ según espectros Raman de carbones activados comerciales y sintetizados. ....	29
<b>Tabla 6.</b> Valores estimados del modelo de Talu y Meunier [26]. $H$ ( $\lim N \rightarrow 0 \delta P \delta N$ ) es la constante de la ley de Henry, $K$ es el grado de autoasociación entre las moléculas de agua, $Nm$ la cantidad absorbida a la máxima humedad relativa (HR =0.84) y $R^2$ es el coeficiente de determinación para los materiales P800 y P800N para temperaturas de 20, 30 y 40 °C. ....	39

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos y abreviaturas

PET	Tereftalato de polietileno
P800	Carbón activado procedente de la transformación de residuos de PET con temperatura final de pirolisis de 800 °C.
P800N	Carbón activado modificado superficialmente con ácido nítrico procedente de la transformación de residuos de PET con temperatura final de pirolisis de 800 °C.
P600	Carbón activado procedente de la transformación de residuos de PET con temperatura final de pirolisis de 600 °C.
P600N	Carbón activado modificado superficialmente con ácido nítrico procedente de la transformación de residuos de PET con temperatura final de pirolisis de 600 °C.
ACCa	Carbón activado comercial sintetizado a partir de residuos agroindustriales de café.
ACCaN	Carbón activado comercial sintetizado a partir de residuos agroindustriales de café modificado superficialmente con ácido nítrico.
ACCc	Carbón activado comercial sintetizado a partir de residuos agroindustriales de coco.
ACCcN	Carbón activado comercial sintetizado a partir de residuos agroindustriales de coco modificado superficialmente con ácido nítrico.
IUPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
$S_{BET}$	Área superficial BET
FWHM	Full Width at Half Maximum
SEM	Microscopía electrónica de barrido
Aw	Actividad acuática
$N_{ads}$	Cantidad de agua adsorbida experimental ( $g \cdot g^{-1}$ )
$N_m, Q_M$	Cantidad de agua adsorbida máxima para el modelo de Talu y Meunier ( $g \cdot g^{-1}$ ) y para el modelo SLE ( $mg \cdot g^{-1}$ ), respectivamente.

---

$K, K^{SLE}$	Parámetro que define el grado de auto-asociación para el modelo de Talu y Meunier y el modelo SLE, respectivamente ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )
$H, H^{SLE}$	Constante de la ley de Henry para el modelo de Talu y Meunier ( $\text{mbar}$ ) y para el modelo SLE ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )
T	Temperatura absoluta del sistema (K)
R	Constante universal de los gases ( $\text{J}(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$ )
P	Presión del sistema ( $\text{mbar}$ ) para adsorción de agua y en ( $\text{atm}$ ) para adsorción de azul de metileno
$P^0, P_s$	Presión de saturación del vapor a la temperatura del sistema ( $\text{mbar}$ ) y en ( $\text{atm}$ ), respectivamente
$Q_{\text{isos}}$	Calor isostérico de adsorción ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ )
$\Delta G$	Cambio en la energía libre de Gibbs ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ )

## Introducción

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo de múltiples procesos humanos. Sin embargo, solo cerca del 0.06% está disponible para su uso [1]. Colombia como miembro de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y como país comprometido con la sostenibilidad, ha enmarcado sus metas en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Asamblea General 2015) y objetivos de desarrollo del milenio (Banco Mundial 2015), los cuales poseen tres metas claves y entrelazadas, la primera centrada en reducir la tasa de mortalidad infantil, la segunda en mejorar la salud de la población y la tercera en brindar un buen servicio de agua y saneamiento. Con el fin de cumplir estos objetivos, se han probado y desarrollado tecnologías para la producción de agua dulce potable, entre ellas, se destaca la desalación de agua de mar [2, 3], la descontaminación de aguas [4, 5], y la deshumidificación del aire [6-13].

Esta última ha sido foco de investigaciones alrededor del mundo, debido a que el aire es una fuente rica y renovable de agua dulce que proporciona un flujo másico constante de vapor de agua que puede emplearse para su producción [12]. Además, el ciclo natural del agua provee una sostenibilidad inigualable en esta fuente, lo que implica una gran ventaja competitiva. De esta manera, múltiples autores han propuesto técnicas y procesos que utilizan materiales adsorbentes, absorbentes y tecnologías de condensación para cumplir con dicho objetivo [6-12].

La materia prima de los materiales adsorbentes puede ser orgánica, inorgánica o polimérica [14-17]. Se han probado compuestos a base de sílice, alúmina, carbones activados y estructuras metal-orgánicas, entre otros, mostrando una alta capacidad de adsorción, alta afinidad y resistencia química y mecánica a diversos ciclos de adsorción/desorción. Por sus propiedades físicas y químicas, su fácil síntesis y sus múltiples precursores, los materiales carbonosos han sido objeto de estudio en los últimos años. Los resultados reportados en la literatura especializada se muestran prometedores para la producción de agua potable [18].

Entre los estudios más destacados sobre el desarrollo de materiales carbonosos para la adsorción de agua, se encuentra el estudio realizado por Tso et al. [9] quienes comprobaron que los materiales compuestos (carbón activado/ $\text{CaCl}_2$ ) aumentan el rendimiento en un 933% sobre el carbón activado virgen, logrando una capacidad de adsorción de hasta 0.23 g de agua por gramo de sorbente para una temperatura de adsorción de 27 °C. Furukawa et al. [19] estudiaron diferentes materiales adsorbentes carbonosos MOF. El material mesoporoso denominado MOF-841 tuvo la mayor capacidad de adsorción de agua ( $0.42 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ), entre sus propiedades principales se encontró con una

alta área superficial de  $990 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  y un volumen de poros de  $0.45 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ . Wang et al. [20] emplearon un material compuesto por carbón activado y cloruro de litio (LiCl), sobre un arreglo corrugado, se encontró un rendimiento de hasta el 36% bajo una humedad relativa del 85%, en el proceso de desorción, y no se obtuvo producción de agua para temperaturas inferiores a  $60^\circ\text{C}$ . Rieth et al. [11] encontraron que el material MOF-801 tiene propiedades que le permiten adsorber grandes cantidades de agua, alcanzando una tasa de adsorción del 82% en peso con baja humedad relativa y bajas temperaturas de adsorción. Li et al. [21] probaron carbones activados modificados. Encontraron que la modificación por oxidación aumenta la capacidad de adsorción en condiciones de baja humedad relativa, logrando capacidades de adsorción de agua de aproximadamente  $0.75 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  al 100% de humedad relativa. Huang et al. [22] testearon la adsorción de agua sobre un carbón activado impregnado con dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). La cantidad de agua adsorbida alcanzó  $57.78 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  para un material con una densidad de  $535 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . También, Gordeeva et al. [13] estudiaron la aplicación de estructuras organometálicas como material adsorbente en Arabia Saudita, el Sahara y Australia. El dispositivo diseñado implementa una generación extra de energía y utilizó el sistema para el proceso de condensación, se obtuvo una producción de 0.346 gramos de agua por gramo de material adsorbente. Todos estos estudios confirman la elevada capacidad de adsorción de agua de los materiales carbonosos cuando son modificados superficialmente.

Los promotores para la síntesis de carbones activados pueden ser tan variados como los desechos de la agroindustria [14], residuos de la industria del petróleo y el gas [15], y productos de actividades humanas altamente contaminantes, como los residuos de PET [16, 17], lo cual genera múltiples beneficios al momento de su uso. Específicamente, estos últimos tienen dos ventajas competitivas significativas, la primera es que al ser productos de desecho poseen un bajo costo comercial bajo y su uso proporcionaría un impacto ambiental positivo. En segundo lugar, al ser un contaminante con un alto contenido de moléculas de carbono de alta pureza y poseer una estructura molecular ordenada suministra una fuente eficiente para la generación de carbón activado mediante procesos de carbonización y activación [23, 24]. Sin embargo, la naturaleza química de los carbones activados posee una preferencia por atraer moléculas apolares. Por tal motivo, se realizan modificaciones superficiales que incluyen la funcionalización con sales higroscópicas, óxidos metálicos y acidificaciones para mejorar la afinidad por las moléculas de agua. Estudios recientes han mostrado que la modificación superficial con ácido nítrico frío, persulfato de amonio y peróxido de hidrógeno aumenta la cantidad de grupos oxigenados presentes en la superficie de los carbones activados y no modifica sustancialmente el volumen poroso, mejorando la afinidad y capacidad adsorptiva de moléculas polares como el agua [25].

Así, el principal objetivo de este estudio es el desarrollo de carbones activados procedentes de la transformación termoquímica de residuos PET para ser aplicados por primera vez en la producción de agua dulce a partir de la deshumidificación del aire. Considerando que su capacidad de adsorción estará estrechamente relacionada con las propiedades fisicoquímicas del material final, los carbones activados sintetizados fueron acidificados

para mejorar su afinidad por los compuestos polares. Así, el tren de pruebas experimentales comprende estudios exhaustivos de caracterización a través de imágenes SEM, análisis XPS, análisis Raman y adsorción de nitrógeno. La capacidad adsorptiva de agua se evaluó bajo un amplio rango de humedades relativas entre 0.1 y 0.8 y temperaturas de 20, 30 y 40 °C. Las isothermas fueron ajustadas mediante el modelo propuesto por Talu y Meunier [26]. Los parámetros termodinámicos derivados de la ecuación de Clausius Clapeyron fueron calculados para comprender la fenomenología del proceso adsorptivo. Finalmente, se evaluó la producción de agua dulce bajo condiciones ambientales reales de la ciudad de Medellín, Antioquia, Colombia, empleando un dispositivo de adsorción/desorción que emplea únicamente energía solar para el proceso de desorción. De esta forma, los carbones activados sintetizados mediante la transformación termoquímica de residuos PET modificados superficialmente permitirán la producción de agua a partir de la deshumidificación del aire por efectos adsorptivos debidos a la alta afinidad y alto volumen micro y mesoporoso generado en las etapas de carbonización, activación y acidificación superficial dado por la alta pureza de la materia prima empleada y la presencia de un alto número de sitios activos oxigenados dispuestos para la interacción con las moléculas de agua.

# 1. Síntesis y caracterización de carbones activados

## 1.1. Metodología

### 1.1.1. Síntesis de carbones activados a partir de la transformación termoquímica de residuos PET

El PET triturado se obtuvo de un punto de reciclaje ubicado en Bogotá, Colombia. Antes de la carbonización, se lavó y secó a una temperatura no mayor a 150 °C para evitar la pérdida de material volátil durante el proceso de eliminación de agua. Posteriormente, se adicionó hidróxido de potasio (KOH) en solución con exceso de 1-Butanol durante 2 días a una temperatura fija de 120 °C para despolimerizar el residuo PET y activarlo para su posterior carbonización. Durante el proceso de degradado se obtuvo un sobrenadante que se desechó y un material sólido (polímero), el cual se filtró y se secó a 60 °C durante 48 horas. Durante el proceso de carbonización, el flujo de nitrógeno se fijó a una tasa de 10 cc·min<sup>-1</sup>. El tiempo de residencia de la muestra bajo esta atmósfera fue de 2 horas. Este proceso ayudará a obtener una superficie preferiblemente hidrófila. La temperatura final del horno tubular fue de 600 °C y 800 °C y la rampa de calentamiento fue de 2 °C·min<sup>-1</sup>. Los materiales sintetizados fueron modificados superficialmente con ácido nítrico para lograr una mayor cantidad de grupos carboxilo e hidroxilo en la superficie del material. Para ello, los carbones activados fueron puestos en contacto con ácido nítrico al 60% durante 30 minutos. Posteriormente, fueron lavados con agua desionizada hasta que el fluido resultante tuviera un pH igual al pH de entrada (7.01). La reacción durante el lavado fue exotérmica. Finalmente, los carbones activados sintetizados se secaron a 120 °C durante 2 horas para eliminar el contenido de agua residual. Los carbones activados sintetizados fueron nombrados como P800, P800N, P600 y P600N, estos denotan la temperatura final de carbonización (800 o 600 °C) y la modificación superficial con ácido nítrico (N). El registro fotográfico del proceso de síntesis se presenta en la Figura 1.



**Figura 1.** Registro fotográfico del proceso de síntesis de los carbones activados a partir de residuos PET. 1) Residuos PET cortados y lavados, 2) Polímero resultante de la degradación y activación de los residuos PET con KOH y 3) Carbón activado producto de la pirólisis del polímero resultante de la degradación y activación de los residuos PET con KOH.

Además, se evaluaron dos carbones activados comerciales sintetizados a partir de residuos agroindustriales de café y cáscara de coco, los cuales fueron suministrados por dos distribuidores colombianos. Estos carbones activados fueron modificados superficialmente siguiendo el proceso anteriormente descrito para mejorar la afinidad por los grupos polares y aumentar la capacidad adsorptiva de agua. Finalmente, estos carbones fueron nombrados como ACCa y ACCaN, para aquellos provenientes de residuos de café y ACCc y ACCcN, para aquellos provenientes de residuos de coco, la “N” denota el proceso de acidificación superficial.

### 1.1.2. Caracterización de carbones activados

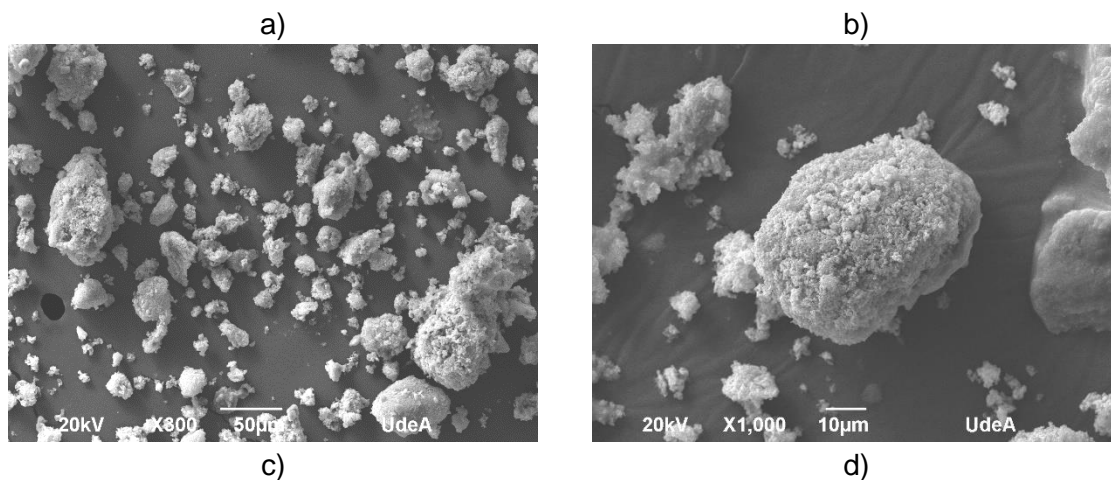
Para la caracterización de los carbones activados, se utilizó el modelo Brunauer-Emmett-Teller [27, 28] para determinar el área superficial (SBET) y la ecuación de Dubinin-Radushkevich [29] para determinar el volumen ( $W_0$ ) y tamaño de los microporos ( $L_0$ ). Para tal fin, se realizaron pruebas de adsorción-desorción de nitrógeno ( $N_2$ ) a  $-196\text{ }^\circ\text{C}$  utilizando un equipo Micromeritic ASAP2020 (Micromeritics, Norcross, GA, EE. UU.). La preparación de las muestras incluyó gasificación en alto vacío a  $110\text{ }^\circ\text{C}$  y  $10^{-6}$  mbar. Además, se realizó Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) para determinar la morfología de las muestras utilizando un microscopio FEI modelo Quanta 400 (Eindhoven, Países Bajos). La técnica Espectroscopía Foelectrónica de Rayos X (XPS) se empleó para determinar la química superficial de los materiales sintetizados y comerciales para ello se empleó un espectrómetro Kratos Axis Ultra-DLD (Manchester, Reino Unido). Una fuente monocromática de Al K $\alpha$  con energía de paso de 90 eV (paso de 1 eV) y 20 eV (paso de 0,1 eV) para espectros generales de alta resolución ( $O_{1s}$ ,  $C_{1s}$ , y  $N_{1s}$ ). La calibración del pico C=C adventicio se realizó a 284.8 eV. Todos los patrones se analizaron utilizando el software XPSpeak4.1. Se utilizó la corrección de fondo tipo Shirley para la corrección de la línea base, mientras que se emplearon diferentes proporciones

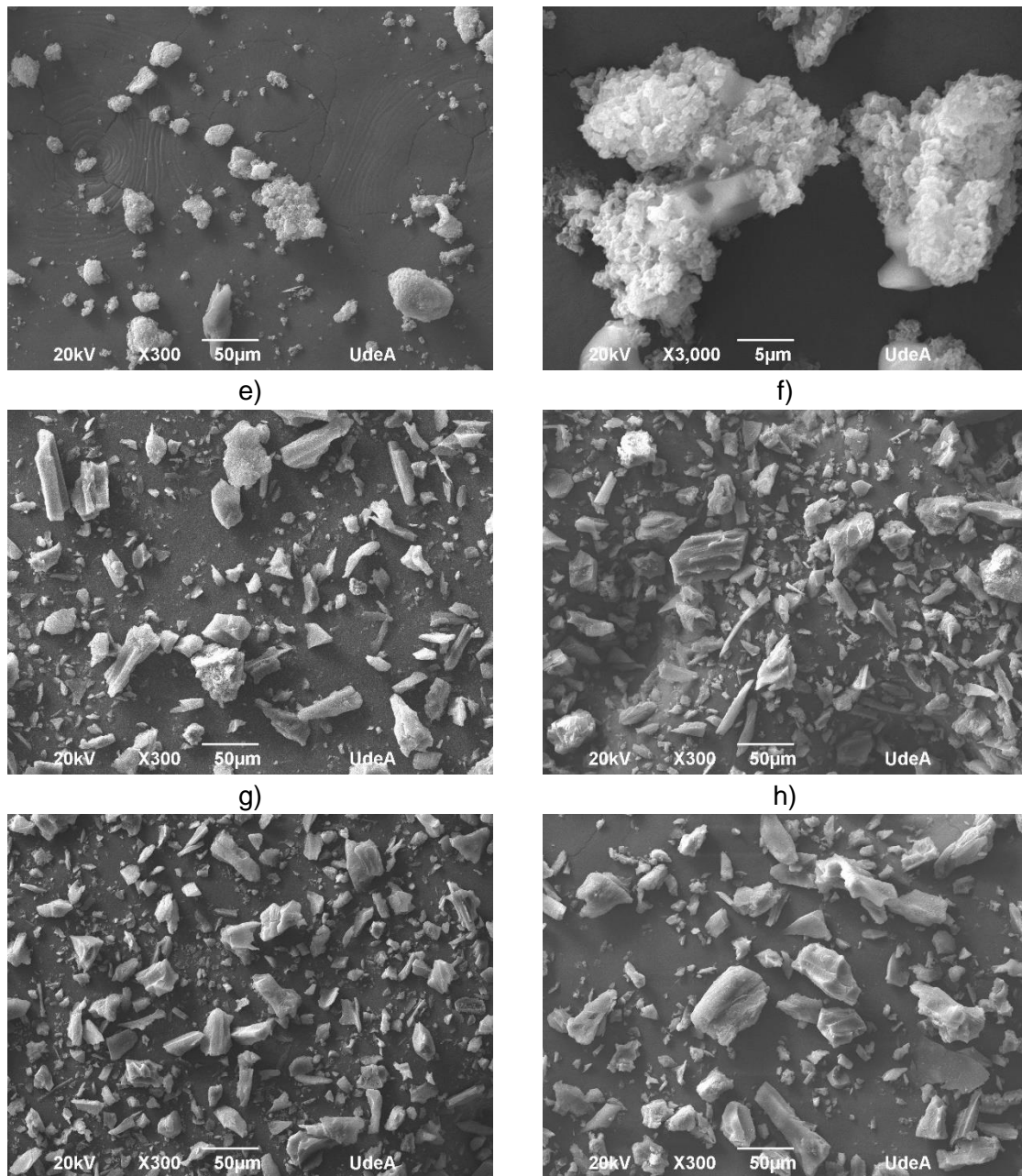
Gaussianas-Lorentzianas para ajustar los picos desconvolucionados. Finalmente, mediante un espectrofotómetro dispersivo Micro-Raman JASCO NRS-5100 (JASCO, Tokio, Japón) se obtuvieron los espectros Raman con el fin de determinar el grado de grafitización de los carbones activados. Los experimentos se evaluaron a condiciones ambientales usando  $\lambda = 532$  nm.

## 1.2. Resultados

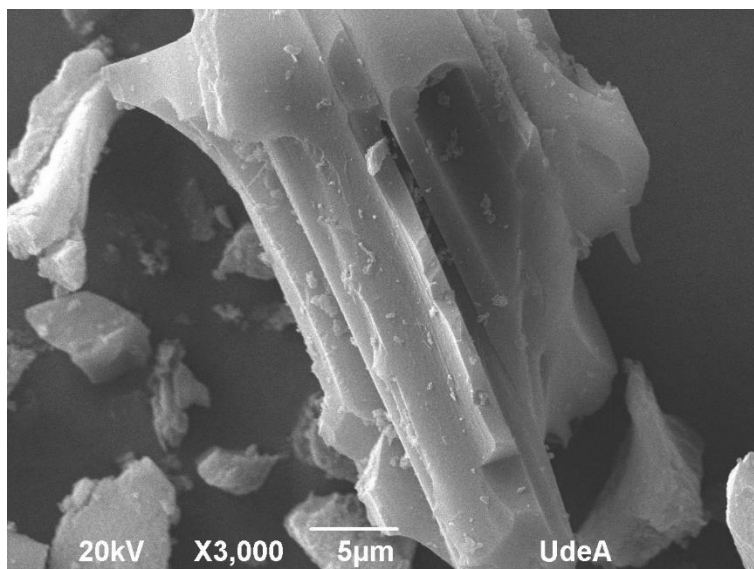
Durante el proceso de carbonización del polímero resultante de la transformación termoquímica de los residuos PET se encontró una eficiencia de aproximadamente  $32.0 \pm 2.3\%$  para los carbones sintetizados hasta una temperatura de  $600^\circ\text{C}$  y del  $28\% \pm 1.5\%$  para aquellos carbonizados hasta una temperatura de  $800^\circ\text{C}$ . Esto se debe a que una temperatura mayor de carbonización permite la eliminación de mayor cantidad de carbonos de la estructura del carbón activo, lo cual conlleva a la formación de un mayor espacio poroso.

La morfología física de las muestras se analizó a través de microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados para los carbones activados antes y después del proceso de acidificación superficial se presentan en la Figura 2. Los resultados mostraron superficies de configuración irregular y fibrosa para los carbones activados sintetizados a partir de residuos agroindustriales de café y coco, como se evidencia en el acercamiento plasmado en la Figura 3. Mientras que, los carbones activados sintetizados a partir de residuos PET mostraron una morfología ovoidea de alta porosidad, como lo presenta la Figura 4. Además, se pudo determinar que la modificación superficial con ácido nítrico no altera sustancialmente la morfología macroscópica de las muestras, en concordancia con lo obtenido por Esfandiari et al. [30]. Las muestras provenientes de desechos PET mostraron una mayor porosidad, la cual pudo ser generada posiblemente por la liberación de compuestos volátiles durante el proceso de pirólisis y por la deshidratación por acción del agente degradante y activante (KOH). Estos resultados están de acuerdo con lo planteado por Ramírez et al. [31]. Finalmente, se encontró que los carbones activados poseían un tamaño micrométrico mayor a  $10\ \mu\text{m}$  para todos los casos.

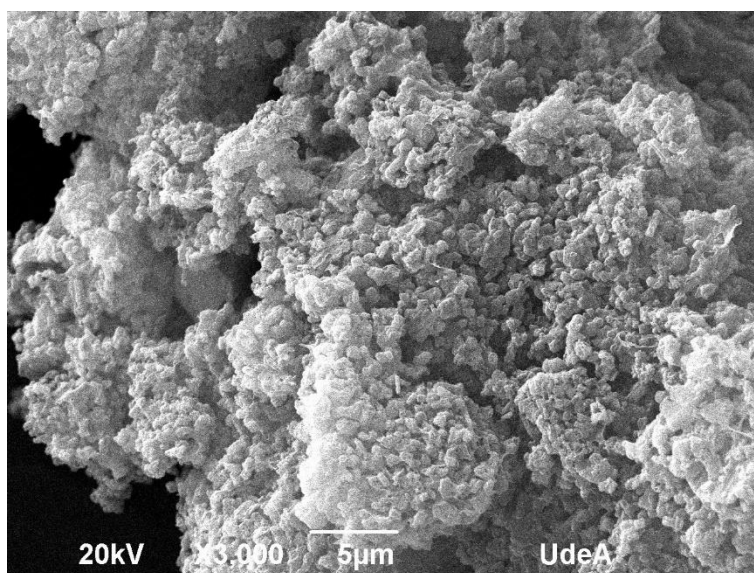




**Figura 2.** Imágenes SEM para los carbones activados a) P800, b) P800N, c) P600, d) P600N, e) ACCa, f) ACCaN, g) ACCc y h) ACCcN.



**Figura 3.** Detalle de la morfología física de los carbones activados sintetizados a partir de residuos agroindustriales de café ACCa.



**Figura 4.** Detalle de la morfología física de los carbones activados sintetizados a partir de residuos PET – P800.

El área superficial y el espacio microporoso de las muestras evaluadas se detallan en la Tabla 1. Se encontraron áreas superficiales mayores a  $616 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  para los carbones activados sintetizados a partir de residuos PET. Estos resultados están de acuerdo con Olam [32] y Ali et al. [33], quienes encontraron áreas superficiales de hasta  $443 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  y  $2010 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , respectivamente. Sin embargo, para los carbones activados sintetizados a partir de desechos agroindustriales de café y coco, el área superficial estuvo debajo de  $440 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , indicando una vaga activación de los carbones ACCa y ACCc. El área

superficial disminuyó en un 5.6, 5.8, 63.0 y 30.9% para los carbones activados P800, P600, ACCa y ACCc después del proceso de acidificación superficial, respectivamente. También se observó que el volumen microporoso disminuye en el mismo sentido. Este resultado muestra que la estructura porosa de los carbones activados a partir de residuos agroindustriales es más susceptible al colapso debido a las altas temperaturas experimentadas durante la reacción exotérmica por efecto del lavado de los carbones después del proceso de acidificación superficial [34, 35]. Todos los carbones activados evaluados poseen un tamaño de poro cercano a  $\sim 2$  nm, por lo cual, según la clasificación IUPAC se clasifican como microporos [36]. Esta clasificación está supeditada a la adsorción de nitrógeno con la cual se calculó el tamaño y volumen microporoso [37, 38], evidenciando que los carbones activados con KOH generan alto volumen mesoporoso. Estos resultados están de acuerdo con lo planteado por Choma et al. [39] y están en concordancia con las isotermas de adsorción de agua encontradas (ver Capítulo 2).

Además, se encontró una relación estrecha entre la temperatura carbonización y el área superficial formada para los carbones activados P800 y P600, donde a mayor temperatura de carbonización mayor es el área superficial. Estos resultados están de acuerdo con lo planteado en literatura especializada [40-42], en la cual, se ha podido evidenciar que las condiciones de carbonización como temperatura, tiempo y método de activación afectan las propiedades texturales expuestas por los carbones activados [43, 44]. Esta tendencia directa entre la temperatura y el área superficial se debe a que un aumento de temperatura aumenta la cantidad de fracciones amorfas del carbono, las cuales son más activas que aquellas fracciones cristalinas y por ende se genera una mayor eliminación de los átomos de carbono durante la activación superficial y carbonización [40-42].

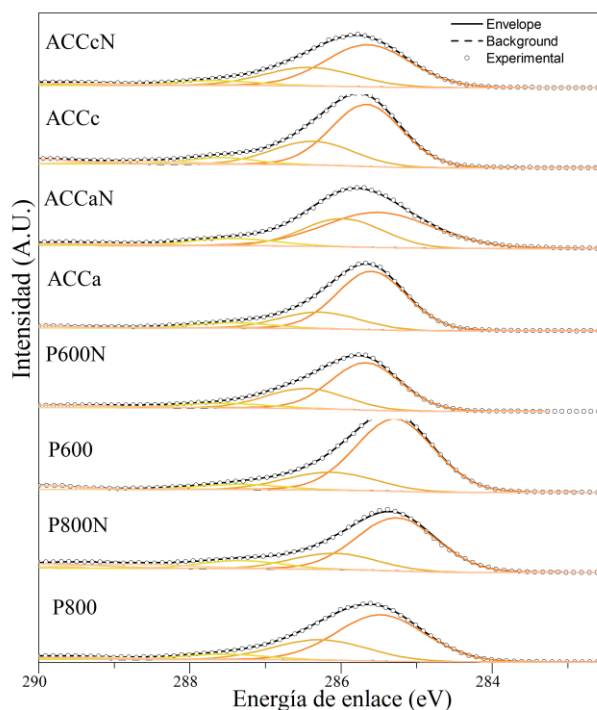
**Tabla 1.** Propiedades superficiales de los carbones activados comerciales y sintetizados.

Carbón activado	Area superficial BET ( $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )	Tamaño promedio de microporo (nm)	Volumen poroso ( $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ )
P800	1313	1.745	0.492
P800N	1240	1.812	0.441
P600	654	1.899	0.311
P600N	616	1.896	0.292
ACCa	439	1.911	0.210
ACCaN	162	2.045	0.083
ACCc	20	2.123	0.009
ACCc	14	2.136	0.008

Se realizó también análisis XPS para determinar la composición superficial de los carbones activados sintetizados. Después de realizar la deconvolución de los patrones XPS para las

regiones  $C_{1s}$ ,  $O_{1s}$  y  $N_{1s}$ , se encontraron cinco, dos y tres picos, respectivamente, los resultados se presentan en las Figuras 5, 6 y 7 y las Tablas 2, 3 y 4.

La región  $C_{1s}$  se discretizó en cinco picos principales. El primer pico estuvo asociado a los enlaces  $C=C$  a una energía de enlace cercana a los  $284.4 \pm 1.6$  eV, estos enlaces ocuparon la mayor área de los espectros, siendo su contribución predominante en todos los sistemas evaluados [45, 46]. Se encontraron también, enlaces tipo  $C-C$  no funcionales para energías cercanas a  $285.2 \pm 1.6$  eV. Los grupos funcionales asociados a alcoholes, fenoles y éteres relacionados con carbones activados [17], se encontraron en forma de enlace  $C-O$  a una energía de enlace cercana a los ( $286.4 \pm 1.6$  eV). Finalmente, con un porcentaje de área menor se encontraron los enlaces  $C=O$  y  $-COO^-$  a energías de enlace de  $287.8$  y  $289.0 \pm 1.6$  eV, respectivamente [47-49]. El pico asociado a la inter-banda  $\pi-\pi^*$  para todas las muestras analizadas fue despreciable [50]. Además, se observó que para el material sin acidificar P800 la contribución de los grupos oxigenados  $C=O$  y  $-COO^-$  fue mayor que para el carbón activado sin acidificar P600, por lo cual, se infiere que una mayor temperatura de carbonización permite la generación de mayor cantidad de grupos oxigenados dispuestos para la interacción con el adsorbato debido a un mayor tiempo de exposición a temperaturas elevadas [51]. Finalmente, se observó que la acidificación superficial con ácido nítrico aumenta la contribución de los picos asociados a los grupos carbonilo y/o a los grupos carboxílicos, lo cual mejora la capacidad de adsorción de moléculas polares como el agua [25]. Esto se debe a que el ácido nítrico tiene la capacidad de aumentar los grupos oxigenados en la superficie de los carbones activados [51].



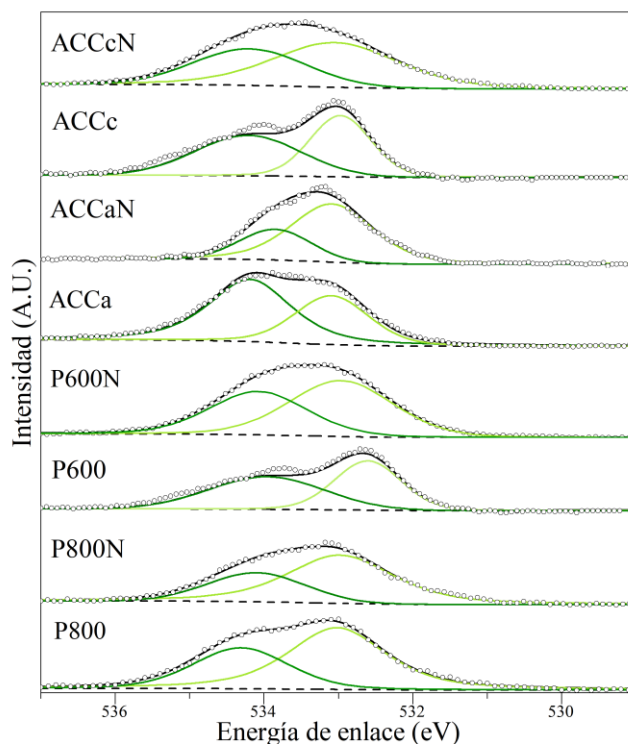
**Figura 5.** Espectros  $C_{1s}$  de alta resolución del análisis XPS de los carbones activados sintetizados y los carbones activados comerciales. La curva negra representa la suma de las curvas deconvolucionadas del patrón XPS.

**Tabla 2.** Contribución de los enlaces típicos para el espectro C<sub>1s</sub> del análisis XPS para los carbones activados sintetizados (P800 y P600) y los carbones activados comerciales (ACCa y ACCc) antes y después del proceso de acidificación superficial.

Material	C1s(±1.6)	Enlace	FWHM (eV)	Área	Porcentaje de contribución (%)
P800N	284.4	C=C	1.22	4432.0	59.3
	285.2	C-C	1.29	1366.7	18.3
	286.4	C-O	1.25	678.5	9.1
	287.8	C=O	1.84	493.4	6.6
	289.0	COO-	1.67	508.8	6.8
P800	284.5	C=C	1.15	5325.9	59.1
	285.2	C-C	1.32	2312.3	25.7
	286.5	C-O	1.09	585.1	6.5
	287.6	C=O	1.74	337.9	3.8
	289.0	COO-	1.11	445.2	4.9
P600N	284.5	C=C	1.13	4372.1	59.1
	285.3	C-C	1.29	2043.4	27.6
	286.4	C-O	1.47	528.9	7.2
	287.6	C=O	1.3	91.6	1.2
	288.7	COO-	1.95	360.9	4.9
P600	284.5	C=C	1.17	6340.2	70.4
	285.3	C-C	1.35	1738.0	19.3
	286.4	C-O	1.24	487.2	5.4
	287.2	C=O	1.29	61.6	0.7
	288.9	COO-	1.03	379.0	4.2
ACCaN	284.3	C=C	1.76	4291.6	54.7
	284.8	C-C	1.3	2394.7	30.5
	286.3	C-O	1.41	679.9	8.7
	288.1	C=O	2.04	256.1	3.3
	288.9	COO-	1.58	223.0	2.8
ACCa	284.4	C=C	1.13	5830.5	67.1
	285.1	C-C	1.30	1827.4	21.0
	286.3	C-O	1.33	608.9	7.0
	287.6	C=O	1.44	87.9	1.0
	289.0	COO-	1.2	331.9	3.8
ACCcN	284.5	C=C	1.38	5049.9	60.0
	285.3	C-C	1.48	2344.3	27.8
	286.5	C-O	1.34	546.8	6.5
	288.4	C=O	1.91	296.0	3.5
	288.9	COO-	1.25	180.9	2.1
ACCc	284.3	C=C	1.35	4661.2	59.8
	285.2	C-C	1.28	1984.9	25.5
	286.3	C-O	1.16	392.1	5.0

287.8	C=O	2.12	578.3	7.4
289.1	COO-	0.98	175.2	2.2

Los resultados encontrados durante la deconvolución de los espectros de alta resolución de los  $O_{1s}$  se resumen en la Figura 6 y la Tabla 3. Las muestras evidenciaron presencia de dos enlaces tipo O=C y O-C, asociados a grupos funcionales tipo ésteres y grupos anhídridos carboxílicos, los cuales, estuvieron presentes en energías de enlace de  $532.5$  y  $533.5 \pm 0.9$  eV [52, 53].



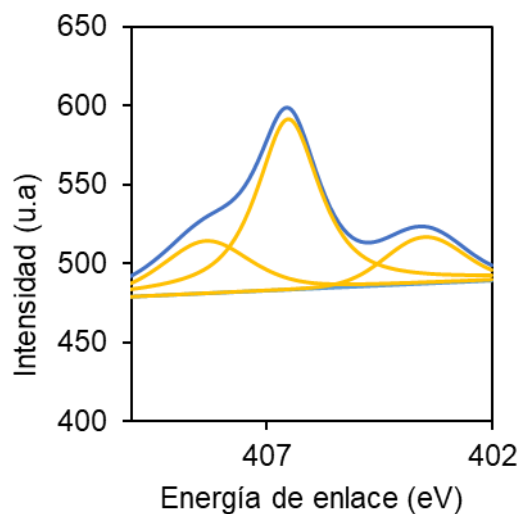
**Figura 6.** Espectros  $O_{1s}$  de alta resolución del análisis XPS de los carbones activados sintetizados y los carbones activados comerciales. La curva negra representa la suma de las curvas deconvolucionadas del patrón XPS.

**Tabla 3.** Contribución de los enlaces típicos para el espectro  $O_{1s}$  del análisis XPS para los carbones activados sintetizados (P800 y P600) y los carbones activados comerciales (ACCa y ACCc) antes y después del proceso de acidificación superficial.

Material	$O_{1s}(\pm 0.9)$	Enlace	FWHM (eV)	Área	Porcentaje de contribución (%)
P800N	533.8	O=C	1.7	3389.7	61.8
	532.4	O-C	1.5	2097.0	38.2
P800	532.9	O=C	2.2	3326.8	71.7
	534.2	O-C	1.9	1312.1	28.3
P600N	531.82	O=C	1.6	1695.7	50.0

	533.67	O-C	2.3	1698.1	50.0
P600	533.02	O=C	1.6	2288.7	64.2
	534.3	O-C	1.5	1279.0	35.8
ACCaN	532.8	O=C	2.1	2275.8	60.8
	534.02	O-C	1.9	1469.7	39.2
ACCa	532.97	O=C	1.9	2131.4	69.3
	534.24	O-C	1.7	944.5	30.7
ACCcN	532.96	O=C	1.9	2391.0	57.5
	534.21	O-C	1.7	1768.4	42.5
ACCc	531.46	O=C	1.5	1895.7	48.2
	533.32	O-C	2.5	2035.5	51.8

Finalmente, se encontraron tres regiones para los grupos nitrogenados en las energías de enlace  $403.5$ ,  $406.53$  y  $408.36 \pm 1.1$  para las muestras P800N, P600N, ACCaN y ACCcN, asociados a la acidificación superficial y a la presencia de grupos  $\text{NO}_2$ , N-O y C-N [51, 54]. La Figura 7 presenta los resultados obtenidos para el carbón activado P800N, para las demás muestras se encontró una contribución similar, con una variación menor al 10%.



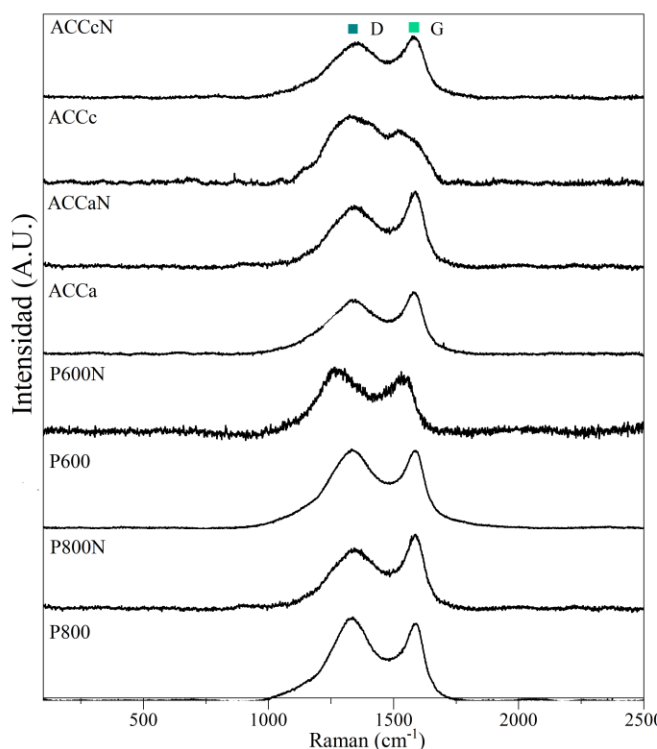
**Figura 7.** Espectros  $\text{N}_{1s}$  de alta resolución del análisis XPS característico de los carbones activados modificados superficialmente con ácido nítrico. La curva azul representa la suma de las curvas deconvolucionadas del patrón XPS.

**Tabla 4.** Contribución de los enlaces típicos para el espectro  $\text{N}_{1s}$  del análisis XPS para el carbón activado (P800N)

Muestras acidificadas	$\text{N}_{1s}(\pm 1.1)$	FWHM (eV)	Área	Porcentaje de contribución (%)
Especies nitrogenadas	403.5	2.00	62.5	$14.8 \pm 0.2$

406.53	1.66	264.4	$62.4 \pm 0.6$
408.36	2.29	96.7	$22.8 \pm 0.3$

El grado de grafitización se puede evaluar considerando el número de onda, el ancho del pico G y la relación de intensidad del pico D/G [55]. Teniendo en cuenta la intensidad de los picos D y G a  $1350 \text{ cm}^{-1}$  y  $1590 \text{ cm}^{-1}$ , respectivamente, se obtuvo el parámetro  $I_D/I_G$  como se presenta en la Figura 8 y Tabla 5. Para todos los casos se encontró un  $I_D/I_G$  mayor a 0.79, lo que demuestra que los carbones activados evaluados poseen bajo orden estructural, estos resultados están de acuerdo con lo planteado por Kishore et al. [56]. Para los carbones activados sintetizados a partir de la transformación termoquímica de residuos PET, se encontró un grado de grafitización similar y alto, igual a 1.12 y 1.01 para los materiales P800 y P600, respectivamente, el cual sugiere que el proceso de activación química realizada con KOH puede generar desorden estructural [57].



**Figura 8.** Espectros Raman de carbones activados comerciales y sintetizados.

Además, durante la acidificación superficial de los carbones activados la relación  $I_D/I_G$  aumenta para casi todos los casos a excepción de los materiales P800N y ACCcN, mostrando que el orden estructural disminuye, por un aumento en el número de defectos estructurales, los cuales pudieron ser causados por la reacción exotérmica generada durante el lavado con agua desionizada después de la acidificación con  $\text{HNO}_3$  de los carbones. Para los materiales P800N y ACCcN se observó un mayor orden de la estructura debido a una reorganización generada por la eliminación de carbonos y sustitución por grupos oxigenados [25, 58-60].

**Tabla 5.** D1350, G1590 e I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> según espectros Raman de carbones activados comerciales y sintetizados.

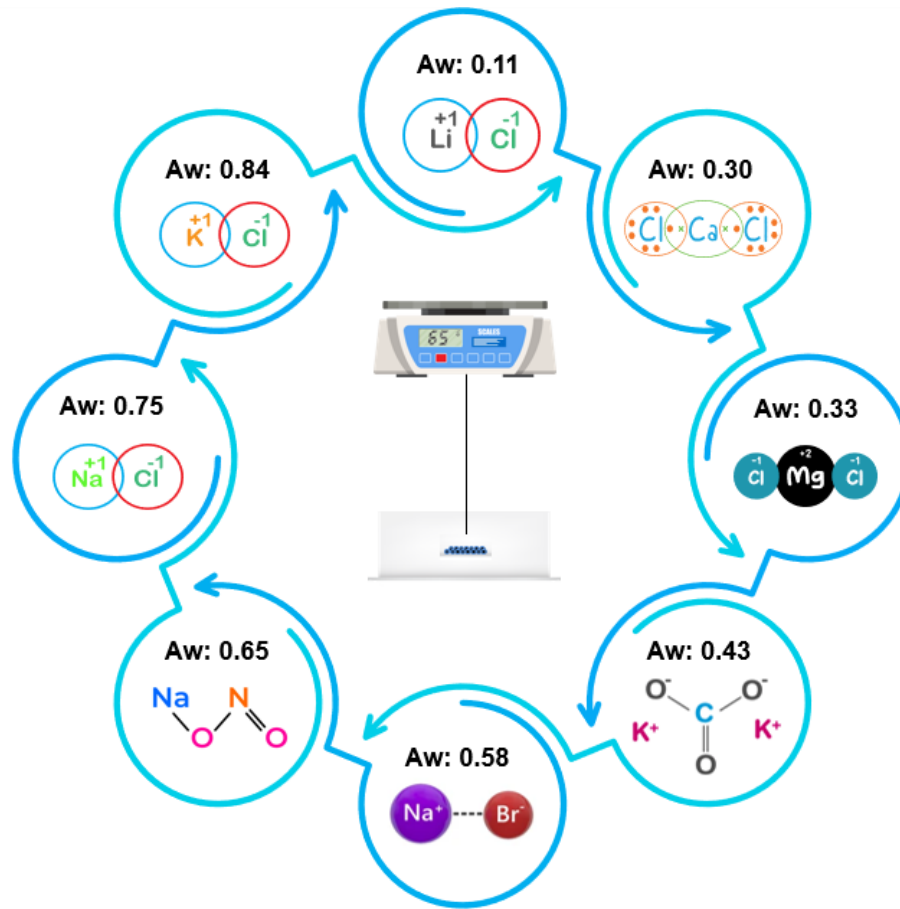
<b>Material</b>	<b>D 1350</b>	<b>G 1590</b>	<b>ID/IG</b>
P800N	884	1113	0.79
P800	2041	1828	1.12
P600N	172	151	1.13
P600	4349	4324	1.01
ACCaN	1366	1550	0.88
ACCa	1421	1647	0.86
ACCcN	3670	3467	1.06
ACCc	3180	2451	1.30

Teniendo en cuenta la caracterización física y química realizada a los carbones activados sintetizados y comerciales, se identificó que aquellos sintetizados a partir de residuos PET poseían mayor área superficial y mayor cantidad de grupos oxigenados (-COO<sup>-</sup>) en comparación a los carbones activados comerciales sintetizados a partir de residuos agroindustriales. Además, se pudo concluir que la funcionalización con ácido nítrico no modifica significativamente la morfología de las muestras, pero si aumenta la cantidad de sitios activos oxigenados y nitrogenados dispuestos para la interacción con las moléculas del adsorbato en la etapa de adsorción de agua. Finalmente, la adsorción del ácido nítrico sobre los carbones activados es de tipo química, por lo cual, este pasa a un estado de nitrógeno elemental, sugiriendo que no habrá contaminación del agua producida durante las etapas de desorción y condensación.

## 2. Isotermas de adsorción de agua

### 2.1. Metodología

La adsorción de agua sobre los carbones activados sintetizados y comerciales se realizó exponiendo los materiales a diferentes condiciones de humedad relativa. Para ello, soluciones sobresaturadas de las sales LiCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaBr, NaNO<sub>2</sub>, NaCl, y KCl fueron preparadas, para emular humedades relativas en un amplio rango entre 0.11 y 0.84 a temperaturas de 20, 30 y 40 °C, siguiendo la metodología planteada por Taborda et al. [61, 62] y Omaña et al. [61, 62]. En cada uno de los ambientes, se dispusieron aproximadamente 30 mg de carbón activado en recipientes abiertos, como se puede observar en la Figura 9. La masa de agua adsorbida se midió después de 5 días para garantizar que se alcanzara el equilibrio de adsorción. La cantidad de agua adsorbida sobre los carbones activados se evaluó de dos formas, la primera midiendo la ganancia de masa utilizando una balanza analítica (OHAUS, Parsippany, EE. UU - precisión de 0.0001 mg) y la segunda calentando las muestras desde 30 °C hasta 200 °C, usando una rampa de calentamiento de 20 °C · min<sup>-1</sup> y un flujo de nitrógeno de 100 mL · min<sup>-1</sup> en un analizador termogravimétrico Q50 (TA Instruments, Inc., New Castel, DE, EE.UU.). Este último como método de validación para corroborar lo obtenido en los microclimas. Ambas metodologías mostraron una cantidad de agua adsorbida similar y cuya variación no sobrepasó el 7% para las muestras evaluadas. La Figura 9 muestra el montaje experimental para la consecución de las isotermas de adsorción [63].



**Figura 9.** Esquema representativo del montaje experimental para llevar a cabo las pruebas de adsorción de agua sobre los carbones activados comerciales y sintetizados antes y después del proceso de modificación superficial con ácido nítrico.

La adsorción de agua ( $N_{ads}$ ) se expresó como gramo de agua por gramo de carbón activado. Para modelar las isotermas de adsorción de agua, se empleó el modelo propuesto por Talu & Meunier [26] quienes incluyen la interacción adsorbato-adsorbato y cuyo modelo se detalla a continuación:

$$\varepsilon = \frac{Nm \cdot N_{ads}}{Nm - N_{ads}} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4K\varepsilon}}{2K} \quad (2)$$

$$P = \frac{H\varphi}{(A + K\varphi)} \text{Exp} \left( \frac{\varphi}{Nm} \right) \quad (3)$$

donde,  $Nm$  es la cantidad de agua adsorbida máxima teórica ( $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $N_{ads}$  es la cantidad de agua adsorbida en el equilibrio ( $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ),  $K$  es el parámetro que indica el grado de auto-

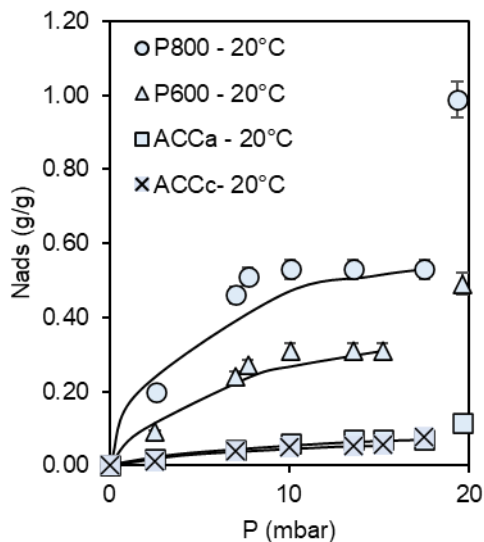
asociación de las moléculas del adsorbato sobre el adsorbente ( $K > 0$ ,  $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) y  $H \left( \lim_{N \rightarrow 0} \frac{\delta P}{\delta N} \right)$  es la constante que indica el grado de afinidad del adsorbente por el adsorbato (mbar). El ajuste del modelo a los datos experimentales se determinó mediante el coeficiente de determinación  $R^2$ , en una escala de 0 a 1 donde 1 determina el mejor ajuste posible.

## 2.2. Resultados

### 2.2.1. Efecto de la materia prima

Las isotermas de sorción para los carbones activados P800, P600, ACCa y ACCc, se presentan en la Figura 10. En el equilibrio de sorción de agua se alcanzó una cantidad adsorbida de hasta  $0.99 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  para el carbón activado P800 a una temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Según la clasificación de la Unión Internacional de química pura y aplicada (IUPAC), las curvas obtenidas siguen una isoterma Tipo IV, característica de materiales mesoporosos [27, 59, 64-66].

Los datos experimentales demarcaron tres áreas en las isotermas de adsorción de agua, una de alta afinidad hasta presiones de 8 mbar, seguido de la formación de una meseta entre las presiones de 8-14 mbar, lo cual corresponde a humedades relativas entre 0.3 y 0.58 para una temperatura de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , debido a la saturación del espacio microporoso [67, 68] y finalmente, se reconoce un área de alta capacidad adsorptiva para presiones superiores a los 18 mbar. El cambio abrupto en la cantidad adsorbida para la máxima presión evaluada (19.6 mbar) se debe a dos factores, el primero asociado al llenado del mesoporo por interacciones adsorbato-adsorbato y el segundo, dado la alta presión a la que está sometido el sistema el vapor de agua puede alcanzar y llenar los espacios microporosos más pequeños. Esta tendencia indica un sistema multicapa, donde a bajas humedades relativas una molécula de  $\text{H}_2\text{O}$  interactúa con un par de grupos hidroxilo, mientras que, a altas humedades relativas, dos o más moléculas de agua interactúan con un par de grupos hidroxilo a través de enlaces de hidrógeno permitiendo el llenado del espacio microporoso, estos resultados están de acuerdo con lo planteado por Basil [69]. Por lo tanto, el sistema multicapa es formado por múltiples puentes de hidrógeno en interacción con los grupos oxigenados presentes en la superficie de los carbones activados y permite una cantidad adsorbida máxima alta para altas presiones [70].



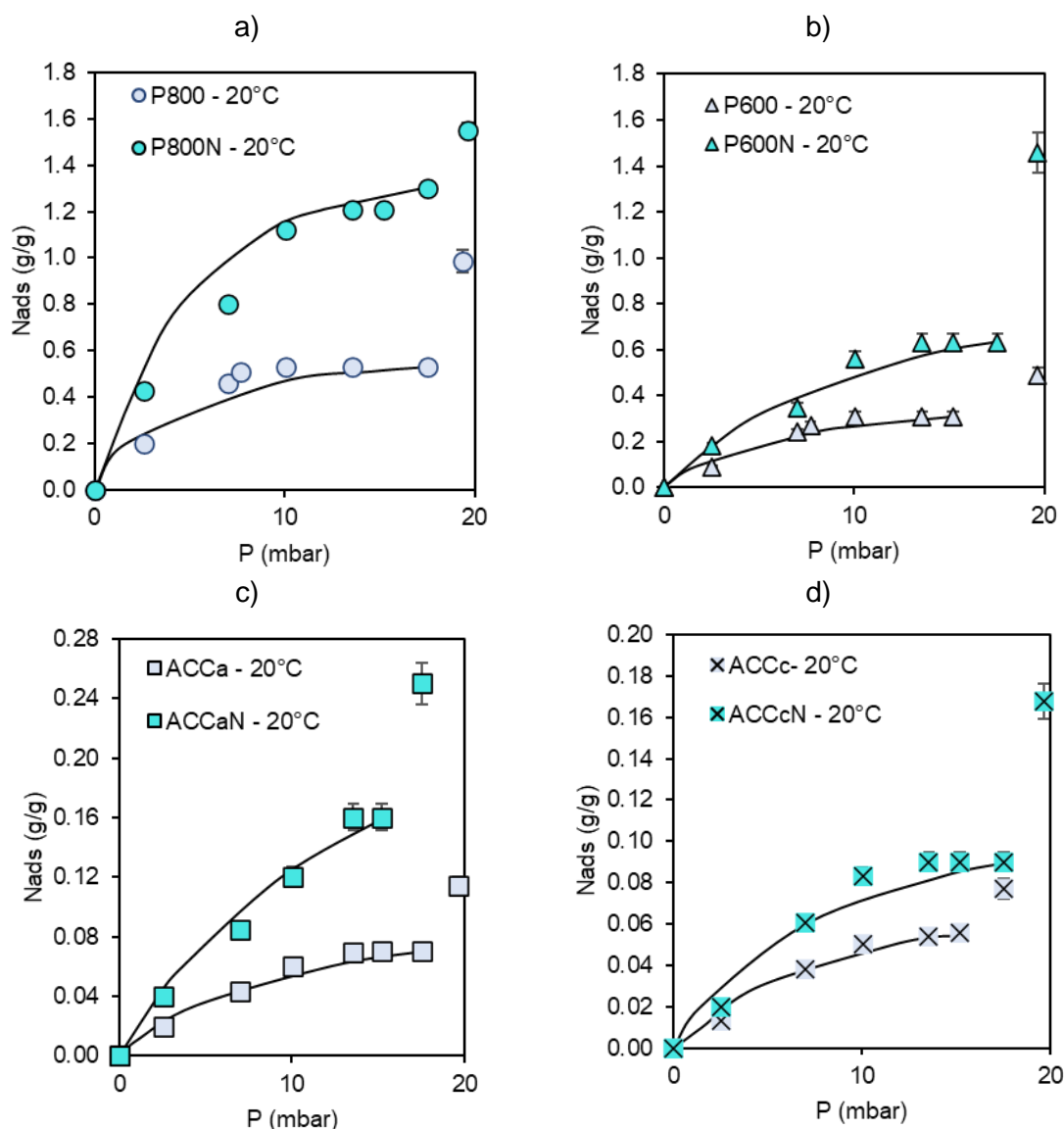
**Figura 10.** Isotermas de adsorción de agua para los carbones activados sintetizados P800 (círculos), P600 (Triángulos), y los carbones activados comerciales ACCa (Cuadrado) y ACCc (Cuadrado equis). Las líneas continuas negras corresponden al modelamiento de las isotermas con el modelo propuesto por Talu y Meunier [26]. Nads corresponde a la cantidad de agua adsorbida ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) y P corresponde a la presión de vapor (mbar) alcanzada en los microclimas.

De esta manera, la cantidad adsorbida aumentó en el orden  $\text{ACCc} < \text{ACCa} < \text{P600} < \text{P800}$  para una temperatura fija de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , en concordancia con los valores de área superficial obtenidos para cada material. Sin embargo, no se encontró relación con el grado de grafitización por el parámetro  $I_D/I_G$ , por lo cual se infiere que la adsorción para los materiales sin acidificar estuvo regida por parámetros netamente superficiales, como el espacio micro y mesoporoso disponible para la interacción adsorbato-adsorbente. Esto se corrobora con la cantidad de agua adsorbida por  $\text{m}^2$  de los materiales P800 y P600 a una presión fija de 19.63 mbar y temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la cual fue igual a  $7.50 \pm 0.03 \times 10^{-4} \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$  para ambos casos. Además, cabe mencionar que los materiales sintetizados P800 y P600 tuvieron cantidades adsorbidas mucho mayores a los materiales comerciales (ACCc y ACCa) debido a su alta área superficial.

## 2.2.2. Efecto acidificación superficial

Se evaluó la adsorción de agua para los carbones activados antes y después del proceso de modificación superficial con ácido nítrico a una temperatura fija de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , los resultados se presentan en la Figura 11 junto con el ajuste dado por el modelo propuesto por Talu y Meunier [26]. Considerando la clasificación IUPAC [71], las isotermas obtenidas se comportan como Tipo IV. Estos resultados están de acuerdo con estudios reportados en literatura [25, 58-60]. La capacidad de adsorción de agua aumentó para todos los sistemas acidificados en comparación a los materiales sin modificación superficial, esto se debe a que el ácido nítrico oxida la superficie y elimina la presencia de algunos átomos de carbono

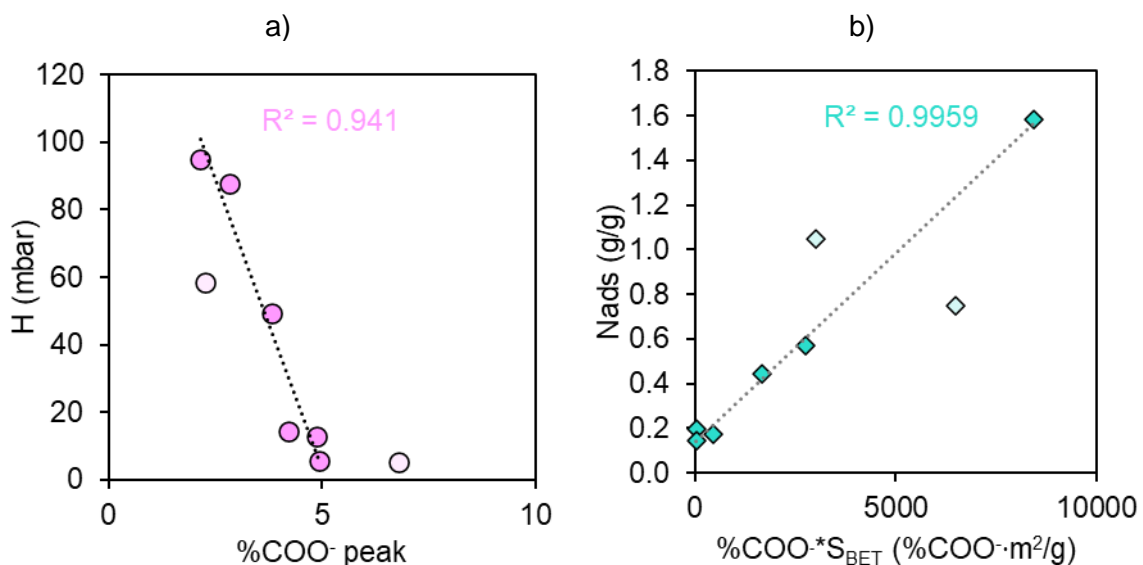
en la superficie del carbón activado, duplicando la presencia de grupos hidrofílicos tipo carboxilo, carbonilo y óxidos de nitrógeno [25, 58-60] en la superficie de los materiales P800N, P600N, ACCcN y ACCaN, los cuales mejoran la afinidad por las moléculas de agua. Cabe señalar que el proceso de acidificación permite que los grupos oxigenados queden expuestos y dispuestos como sitios activos para la interacción con las moléculas de H<sub>2</sub>O sin causar contaminación del agua producida. Esto se debe a que los grupos funcionales oxigenados presentes en la superficie de los carbones activados están fuertemente enlazados debido a procesos de quimisorción [72, 73]. Además, se observó que al acidificar los materiales el área superficial para todos los casos disminuyó, teniendo una tendencia contraria a la encontrada para la cantidad adsorbida, por lo cual, el proceso de adsorción deja de estar gobernado por el área superficial disponible para la interacción adsorbato-adsorbente y predomina la afinidad de los carbones activados por el agua.



**Figura 11.** Isotermas de adsorción de agua para los carbones activados sintetizados P800 (círculos), P600 (Triángulos), y los carbones activados comerciales ACCa

(Cuadrado) y ACCc (Cuadrado equis). Sin acidificación superficial (azul claro) y acidificados superficialmente (azul aguamarina). Las líneas continuas negras corresponden al modelamiento de las isotermas con el modelo propuesto por Talu y Meunier [26]. Nads corresponde a la cantidad de agua adsorbida ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) y P corresponde a la presión de vapor (mbar) alcanzada en los microclimas.

Finalmente, según el análisis XPS se evidenció una tendencia entre la afinidad dada por el parámetro H (mbar) del modelo de Talu y Meunier [26] y el porcentaje del pico correspondiente al enlace  $-\text{COO}^-$  del espectro C1 del análisis XPS. Así, de acuerdo con la Figura 12a. se concluyó que, a mayor porcentaje de contribución del pico  $-\text{COO}^-$ , menor es el valor de H y en consecuencia mayor afinidad. De acuerdo con estos resultados, se puede inferir una interacción entre la molécula polar ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y el ion carboxilato ( $-\text{COO}^-$ ) de tipo electrostática, la cual se da a través de la carga parcialmente positiva de los átomos de hidrogeno presentes en la estructura molecular del adsorbato y la carga negativa del grupo oxigenado expuesto en la superficie del adsorbente [74-76]. Además, de acuerdo con la Figura 12b. se determinó que la cantidad de grupos  $-\text{COO}^-$  disponibles en el área de interacción (área superficial  $S_{\text{BET}}$ ) influye directamente en la cantidad adsorbida para una presión fija de 19.63 mbar y una temperatura de 20 °C.



**Figura 12.** a) Relación entre el parámetro H (mbar) y el porcentaje del pico asociado al enlace  $-\text{COO}^-$  del análisis XPS y b) Relación entre la cantidad de grupos asociados al enlace  $-\text{COO}^-$  del análisis XPS por el área disponible para la interacción y la cantidad adsorbida (Nads) tomada para una presión de 19.63 mbar y una temperatura fija de 20°C.

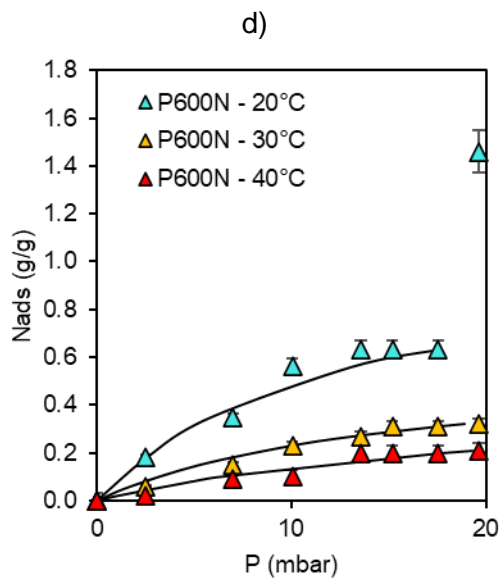
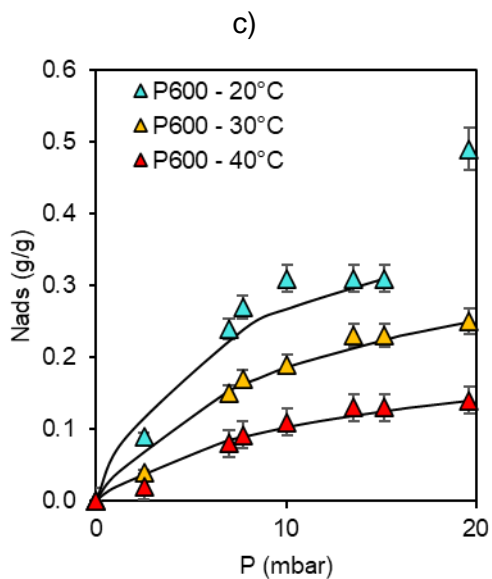
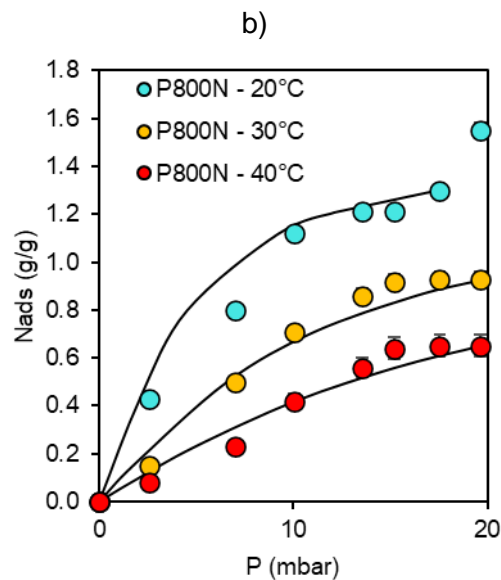
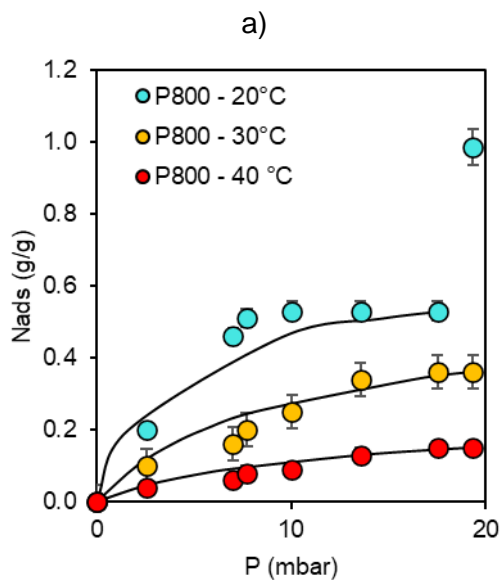
De esta forma, se comprende que la interacción entre los grupos carboxílicos y otros grupos oxigenados como  $\text{C}=\text{O}$ ,  $\text{C}-\text{O}$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{N}=\text{O}$ , con las molécula de  $\text{H}_2\text{O}$  es indispensable y gobierna la adsorción de agua sobre los carbones activados a través de la formación de

puentes de hidrogeno e interacciones electrostáticas [77]. Estos resultados están de acuerdo con lo planteado por Nishino al. [78].

### 2.2.3. Efecto de la temperatura

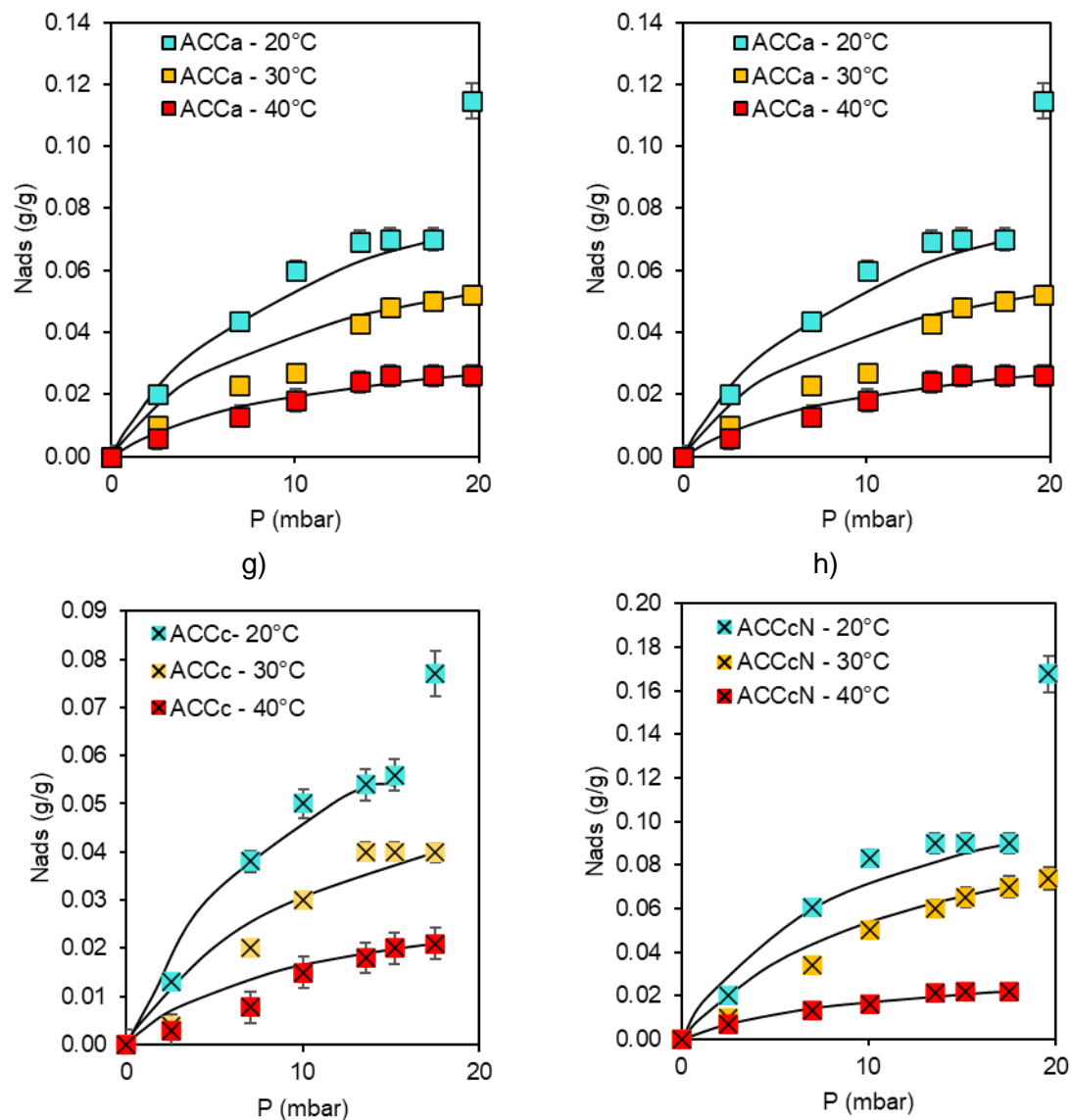
El efecto de la temperatura sobre la adsorción de agua de los carbones activados comerciales y sintetizados se evaluó para temperaturas de 20, 30 y 40°C, debido a que es este rango de temperaturas la que se encuentra en los lugares de alto estrés hídrico en horas nocturnas donde se pretende llevar a cabo la adsorción de agua. La Figura 13 muestra las isotermas encontradas para los ocho carbones activados sintetizados y el ajuste teórico realizado con el modelo de Talu y Meunier [26]. Se encontró que todos los materiales para temperaturas de 30 °C y 40°C describen isotermas Tipo I según la clasificación IUPAC, esto se debe a que hay un desplazamiento de las isotermas de adsorción de agua hacia la derecha por efecto de un aumento de temperatura, propio de reacciones exotérmicas. Así, para la máxima presión evaluada (19.63 mbar) el sistema se encuentra en la etapa de saturación del espacio microporoso y la alta energía cinética de las moléculas del adsorbato no permite el ingreso al espacio microporoso más estrecho, por lo cual, el cambio de concavidad observado para una temperatura del sistema de 20 °C en el rango de presiones entre 18-20 mbar no es observado.

En este sentido, la fuerza de interacción entre el agua y el carbón activado se debilita con el aumento de temperatura, lo cual favorece la desorción del sistema. Así, la cantidad de agua adsorbida para una presión fija disminuye con el aumento de temperatura. De esta forma, para una presión de 19.35 mbar, la cantidad de agua adsorbida para P800N disminuye de 1.55 g·g<sup>-1</sup> a 20 °C a 0.93 g·g<sup>-1</sup> y 0.65 g·g<sup>-1</sup> a 30 °C, y 40 °C, respectivamente, indicando que la adsorción de agua sobre los carbones activados probados se da a través de una reacción exotérmica. Caso similar ocurre para los materiales restantes. Este comportamiento se debe a que el aumento en temperatura aumenta la energía cinética de las moléculas del adsorbato, promoviendo el rompimiento de los puentes de hidrogeno, lo cual disminuye significativamente la fuerza de interacción adsorbato-adsorbente [79].



e)

f)



**Figura 13.** Isotermas de adsorción de agua para los carbones activados a) P800, b) P800N, c) P600, d) P600N, e) ACCa, f) ACCaN, g) ACCc y h) ACCcN bajo temperaturas de 20 °C (marcadores azul aguamarina), 30 °C (marcadores amarillos) y 40 °C (marcadores rojos). Las líneas continuas negras corresponden al modelamiento de las isotermas con el modelo propuesto por Talu y Meunier [26]. Nads corresponde a la cantidad de agua adsorbida ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) y P corresponde a la presión de vapor (mbar) alcanzada en los microclimas.

Además, los resultados experimentales fueron validados mediante el ajuste de Talu y Meunier (Tabla 6) [26], donde se obtuvo un aumento en el parámetro  $H$  y una disminución de la cantidad máxima adsorbida teórica ( $Nm$ ) cuando la temperatura aumenta de 20 a 40 °C. Los parámetros  $H$  y  $Nm$  aumentaron en el sentido  $\text{P800N} < \text{P600N} < \text{ACCaN} < \text{ACCcN}$  para los materiales acidificados lo cual corrobora la alta afinidad de los materiales por el

agua en presencia de mayor número de grupos oxigenados [80-82]. Esta misma tendencia se observó para los materiales sin acidificar, lo cual indica que los carbones activados sintetizados a partir de la transformación termoquímica de residuos PET poseen propiedades fisicoquímicas propicias para la adsorción de agua, en comparación con los materiales comerciales evaluados, entre estas propiedades se destaca mayor área superficial, mayor volumen poroso y mayor porcentaje de grupos oxigenados asociados al proceso de carbonización y activación química. Además, se observó una disminución en el parámetro  $K$  con el aumento en temperatura para todos los materiales evaluados. Esto se debe a que a menor temperatura hay una mayor autoasociación de las moléculas de agua sobre la superficie del carbón activado, lo cual, facilita la interacción del adsorbato con los sitios activos propios del material adsorbente. Los resultados están en concordancia con lo obtenido por Taborda et al. [61], quienes encontraron un aumento en el parámetro  $H$  y un aumento en el parámetro  $K$  debido al aumento en temperatura durante la adsorción de agua. Finalmente, se observó un coeficiente  $R^2 > 0.9$ , indicando un buen ajuste del modelo hacia los datos experimentales.

**Tabla 6.** Valores estimados del modelo de Talu y Meunier [26].  $H \left( \lim_{N \rightarrow 0} \frac{\delta P}{\delta N} \right)$  es la constante de la ley de Henry,  $K$  es el grado de autoasociación entre las moléculas de agua,  $Nm$  la cantidad absorbida a la máxima humedad relativa ( $HR = 0.84$ ) y  $R^2$  es el coeficiente de determinación para los materiales P800 y P800N para temperaturas de 20, 30 y 40 °C.

Material	Temperatura (°C)	$H$ (mbar)	$K$ (g·g <sup>-1</sup> )	$Nm$ (g·g <sup>-1</sup> )	$R^2$
P800	20	5.513	0.531	0.749	0.9
	30	16.531	0.470	0.670	0.9
	40	44.000	0.433	0.346	0.9
P800N	20	5.165	0.900	1.580	1.0
	30	11.513	0.750	1.420	1.0
	40	20.132	0.710	1.300	1.0
P600	20	14.200	0.521	0.569	0.9
	30	26.431	0.450	0.521	1.0
	40	49.121	0.421	0.330	1.0
P600N	20	12.644	0.721	1.050	1.0
	30	26.032	0.512	0.714	1.0
	40	48.032	0.432	0.614	0.9
ACCa	20	87.634	0.410	0.175	0.9
	30	113.634	0.340	0.124	0.9

	40	249.953	0.294	0.067	1.0
	20	49.200	0.650	0.446	0.9
ACCaN	30	90.777	0.490	0.310	1.0
	40	183.794	0.320	0.082	0.9
	20	94.993	0.388	0.143	0.9
ACCc	30	162.312	0.274	0.109	1.0
	40	273.200	0.253	0.054	1.0
	20	58.644	0.620	0.196	1.0
ACCcN	30	94.432	0.420	0.186	1.0
	40	272.432	0.275	0.058	1.0

Los resultados encontrados en la etapa de adsorción de agua para temperaturas de 20 °C, 30 °C y 40 °C mostraron la alta capacidad de los carbones activados sintetizados a partir de la transformación termoquímica de residuos PET para adsorber las moléculas de agua a diferentes condiciones atmosféricas de humedad relativa y temperatura. Además, se logró relacionar la cantidad de agua adsorbida con las propiedades fisicoquímicas de los materiales, donde la sinergia entre la alta área superficial y el alto contenido de grupos oxigenados dispuestos para las interacciones tipo electrostáticas (ion-dipolo) entre el ion carboxilato y la molécula de agua permite obtener cantidades adsorbidas máximas según el modelo propuesto por Talu & Meunier de hasta 1.58 g·g<sup>-1</sup> y 1.06 g·g<sup>-1</sup> para los materiales P800N y P600N, respectivamente, para una temperatura de 20 °C.

## 3. Parámetros termodinámicos

### 3.1. Metodología

El calor isostérico ( $Q_{isost}$ ) y el cambio en la energía libre de Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) se estiman a partir de las ecuaciones 4 y 5, las cuales son derivadas de la ecuación de Clausius Clapeyron [83-86]:

$$\left[ \frac{\partial \ln P}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right]_N = - \frac{Q_{isost}}{RPM} \quad (4)$$

$$\Delta G = RT \ln \left( \frac{P^\circ}{P} \right) \quad (5)$$

Donde,  $\left[ \frac{\partial \ln P}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)} \right]_N$  es la pendiente de la grafica  $\frac{1}{T}$  vs  $\ln P$  a una cantidad adsorbida fija,  $R$  es la constante universal de los gases ( $J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ ),  $PM$  es el peso molecular del adsorbato ( $g \cdot mol^{-1}$ ),  $T$  es la temperatura absoluta del sistema (K),  $P$  es la presión de saturación del sistema a la temperatura evaluada (mbar) y  $P^\circ$  es la presión de vapor de agua a la misma condición de temperatura (mbar).

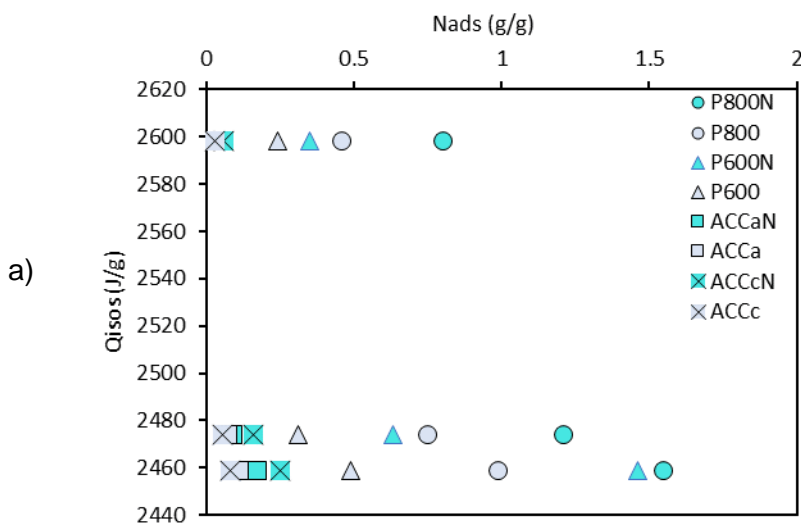
### 3.2. Resultados

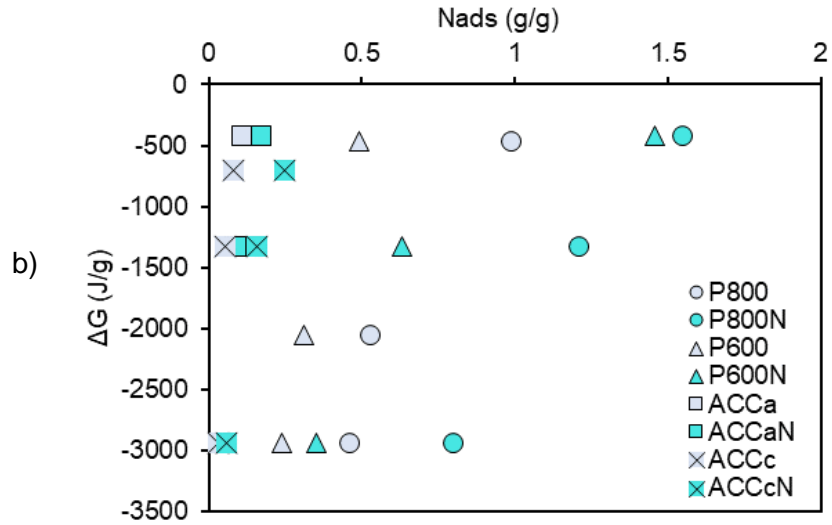
El calor isostérico está asociado a la entalpia de sorción, la cual indica la fuerza de unión entre las moléculas de agua y la superficie del carbón activado. Para un sistema multicapa la fuerza de unión entre las moléculas será menor en comparación a un sistema monocapa y esta fuerza disminuye conforme aumenta la distancia a la superficie del adsorbato [68, 87]. Mientras que, el cambio en la energía libre de Gibbs está relacionado con la espontaneidad del proceso adsortivo, indicando el trabajo máximo reversible que puede ocurrir en un sistema adsorbato-adsorbente, bajo condiciones estables de presión y temperatura. Así, estas dos propiedades termodinámicas son esenciales para describir la fenomenología del proceso adsortivo.

La Figura 14a. presenta el comportamiento del calor isostérico de sorción ( $Q_{isost}$ ) para los ocho carbones activados evaluados en la etapa de adsorción de agua. El  $Q_{isost}$  se representa en función de la cantidad adsorbida. Para todos los casos, se observó que para mayor cantidad adsorbida menor es el calor isostérico esto se debe a que las moléculas

adsorbidas en la superficie del material estarán más comprimidas que las que se encuentran más alejadas. Por lo tanto, en el equilibrio, habrá una disminución en los niveles de energía debido a la interacción  $H_2O-H_2O$  [61]. Además, la disminución acentuada del calor isostérico en el sentido ACCc – ACCa – P600 – P800 hasta valores cercanos  $2480 J \cdot g^{-1}$  y posteriormente moderada (menor pendiente) hasta valores cercanos a  $2331.4 J \cdot g^{-1}$  demuestra una mayor intensidad en las fuerzas intermoleculares existentes entre el adsorbato y el adsorbente y entre las moléculas del adsorbato, respectivamente [88]. Este comportamiento se debe a que a mayor cantidad de moléculas de agua adsorbidas, se promueve la formación de clusters durante la interacción adsorbato-adsorbato, por lo cual el radio de curvatura aumenta y los  $Q_{isos}$  se acercan al calor isostérico de vaporización del agua [89, 90]. Estos resultados favorecen la desorción y posterior producción de agua dulce [91, 92].

Por otro lado, la Figura 14b. presenta el cambio en la energía libre, termodinámicamente se encontró que las reacciones son espontáneas y heterogéneas en el rango de temperaturas evaluado [92]. Asimismo, en el sentido  $P800N > P600N > P800 > P600 > ACCaN > ACCcN > ACCa > ACCc$  para humedades relativas y cantidades adsorbidas altas el  $|\Delta G|$  es menor, lo cual indica que las moléculas se enlazan débilmente con la superficie durante un proceso exotérmico, por lo tanto, para estas condiciones de humedad relativa el requerimiento energético para llevar a cabo la producción de agua será menor. Estos resultados están de acuerdo con lo encontrado en el análisis del calor isostérico de adsorción.





**Figura 14.** a) Calor isostérico de sorción de agua y b) Relación entre el cambio en la energía libre de Gibbs y la cantidad de agua adsorbida para los carbones activados sintetizados y comerciales.

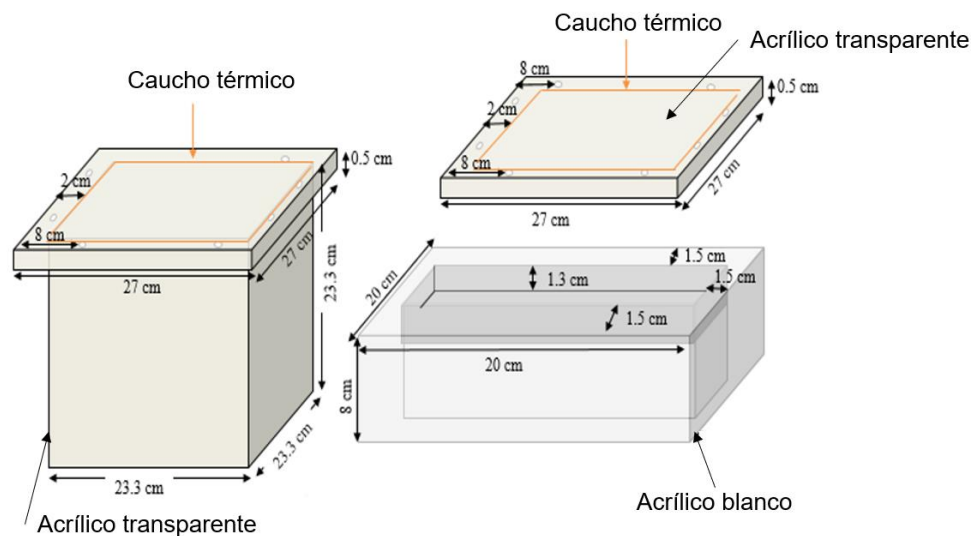
De acuerdo con lo encontrado durante la evaluación de los parámetros termodinámicos asociados al proceso de adsorción de agua sobre los carbones activados sintetizados a partir de desechos PET y residuos agroindustriales de café y coco, se concluye que el material P800N posee la mayor capacidad de adsorción y posterior producción de agua dulce. Esto se debe a que el proceso adsorptivo se definió como espontáneo y reversible para el rango de humedades relativas y temperaturas evaluadas. Además, este material tuvo la mayor capacidad adsorptiva de agua. Así entonces, se propone la utilización de este para la prueba de adsorción/desorción bajo condiciones ambientales de Medellín, Antioquía, empleando un equipo simple para la producción de agua dulce.

## 4. Producción de agua dulce en condiciones ambientales de Medellín, Antioquia

### 4.1. Metodología

El dispositivo utilizado para la evaluación en condiciones reales estuvo compuesto por dos cajas: la primera soporta el material y la otra el condensador, luciendo un diseño sencillo para ser puesto en marcha en terrenos complejos, propios de zonas con alto estrés hídrico. La primera caja tuvo espacio durante la desorción, condensación y recogida de agua. Esta fue fabricada en acrílico blanco con dimensiones de 0.2x0.2x0.08 m. En su interior contó con una plataforma cuadrada de 0.013 m de profundidad para disponer el material en una capa fina que permita la adsorción y evite los fenómenos de difusión. Esta plataforma fue fabricada en material acrílico de color negro, con lo que se podría maximizar la emisión y absorción de calor, facilitando así la desorción de agua. Esta plataforma contuvo el material absorbente para los procesos de sorción y desorción de agua.

La segunda caja, en la que se alojó el concentrador de calor, tuvo dimensiones de 0.23x0.23x0.23 m. La abertura de la caja se ubicó a 0.02 m de los lados de las tapas de unión del condensador, el acrílico fue incoloro para facilitar el proceso de observación durante las pruebas y su espesor fue de 0.005 m. La unión entre el condensador y la tapa (0.27x0.27x0.005 m) funcionó como una brida, para desmontar las muestras sin operaciones destructivas. Esto pudo lograrse gracias a una serie de orificios en los que se montaron los pernos de conexión. Estos orificios se encontraban en la tapa y en la parte superior del condensador cada 8 cm, eliminando la posibilidad de fugas de vapor de agua durante el proceso de desorción. Para sellar de manera más eficiente las juntas del condensador con su respectiva tapa, se implementó una junta térmica (goma) adherida tanto a la tapa del condensador como a la parte superior de esta. En la Figura 15 se presenta una representación gráfica del diseño y dimensiones del dispositivo empleado.



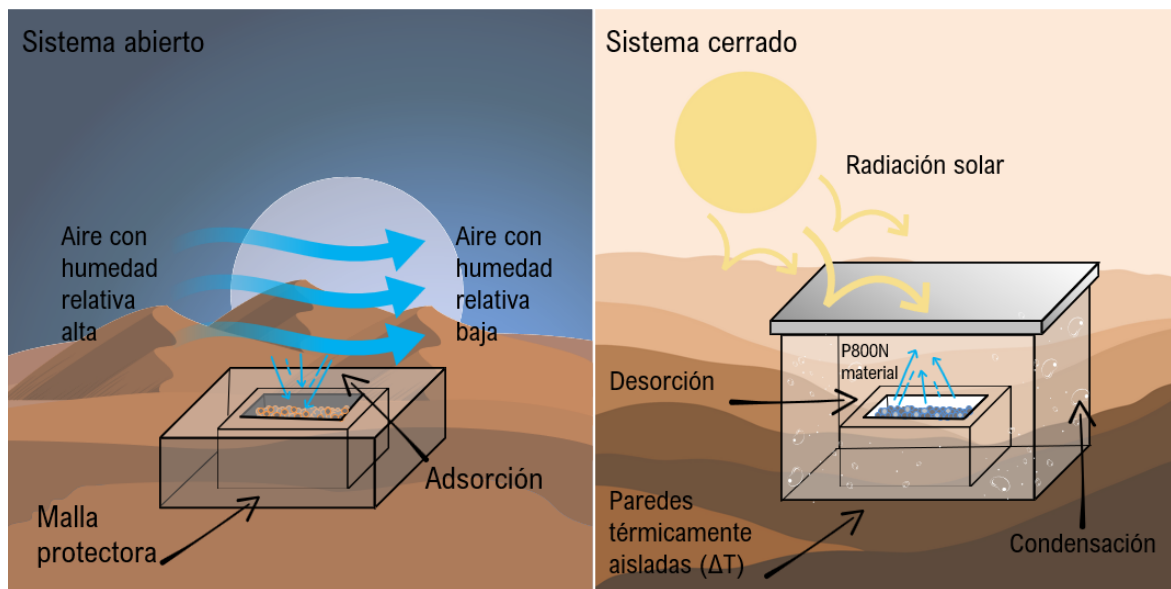
**Figura 15.** Representación del diseño y dimensiones del dispositivo de adsorción/desorción empleado durante la producción de agua bajo condiciones ambientales de Medellín, Antioquia.

Para determinar la producción de agua dulce a partir de la deshumidificación del aire en condiciones reales empleando únicamente energía solar se siguieron los pasos a numerados a continuación:

1. **Adsorción de agua dulce:** Durante las horas de la tarde y primeras horas de la mañana, las condiciones meteorológicas son óptimas para lograr la mayor adsorción de agua (menor temperatura, mayor velocidad del viento y mayor humedad relativa), por lo cual, en este rango horario se dispone el carbón activado en un dispositivo abierto diseñado para tal fin. El dispositivo permite la disposición del material en una capa fina, por la cual, pasa la corriente de aire. El material es protegido con una malla para evitar la contaminación y la pérdida de material.
2. **Producción de agua dulce:** El dispositivo es cerrado y es expuesto a los rayos solares durante las horas diurnas. A medida que pasa el día, el sol irradia el adsorbente y la temperatura aumenta, favoreciendo la desorción. El proceso de desorción ocurre cuando la temperatura del sistema cerrado logra evaporar el agua adsorbida. Debido a una diferencia de temperatura en el dispositivo, se produce un proceso de condensación y se recupera el agua.

Durante el experimento se midieron variables como la temperatura promedio de adsorción y desorción, la humedad relativa y la velocidad promedio del aire empleando un anemómetro digital y un higrómetro de interior. El dispositivo fue ubicado a 0° con respecto al suelo. Durante la prueba se empleó el carbón activado sintetizado a partir de la transformación termoquímica de residuos PET, carbonizado hasta 800°C y modificado superficialmente con ácido nítrico debido a su desempeño superior en pruebas de

adsorción de agua. El montaje experimental de la prueba en campo se muestra en la Figura 16.



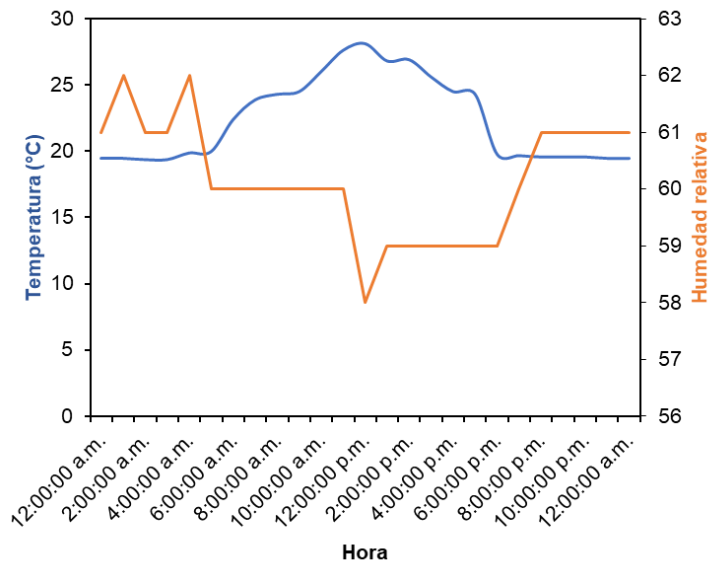
**Figura 16.** Representación esquemática de las etapas de sorción (izquierda) y desorción (derecha) para la producción de agua dulce a partir de la deshumidificación del aire.

## 4.2. Resultados

La Figura 17 resume las condiciones ambientales promedio observadas durante la prueba bajo condiciones ambientales de Medellín, Antioquia. Las condiciones medidas durante la prueba son similares a las reportadas en estudios anteriores en otros ambientes del territorio colombiano [63]. Se encontró que el material adsorbió con una eficiencia del 87.0%, refiriendo a eficiencia como la cantidad de agua adsorbida con respecto a la capacidad adsorptiva del material ( $1.4 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) a la humedad relativa promedio obtenido durante las pruebas de adsorción de agua ( $HR = 0.60$ ) durante la evaluación a condiciones ambientales de Medellín, Antioquia. De esta manera, se concluye que, durante la etapa de adsorción, el material tuvo un comportamiento esperado gracias a su alto carácter hidrofílico. Además, se deduce que no se logró el 100% de adsorción de agua debido a limitantes ambientales como baja velocidad del viento, parámetro que impacta sustancialmente la cantidad de vapor de agua disponible para ser captado.

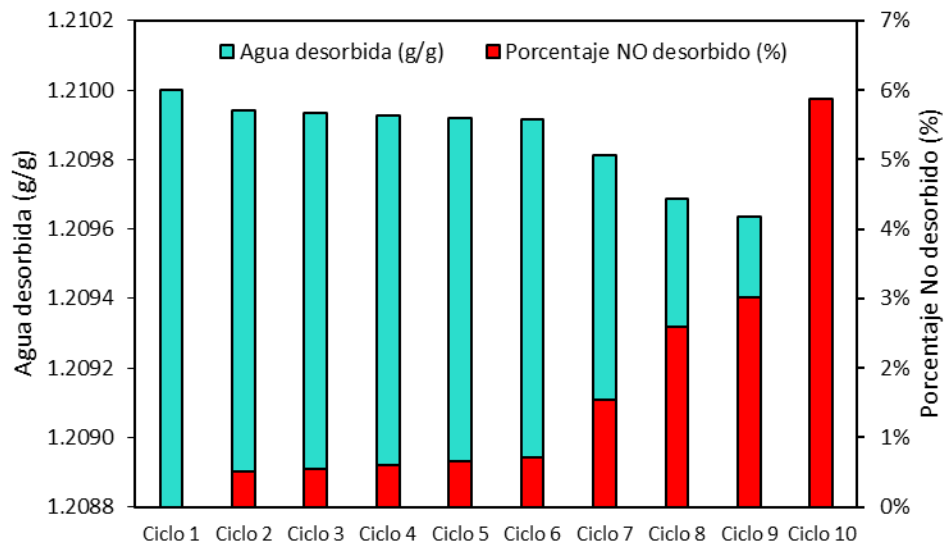
Durante, la etapa de desorción y condensación se obtuvo una productividad (masa de agua condensada/masa de material seco) de  $0.9 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ , la cual es superior a la reportada en estudios anteriores, en los cuales se empleó  $\text{SiO}_2$  no porosa. Este último material poseía una capacidad adsorptiva de agua igual a  $0.58 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  bajo las mismas condiciones de HR, lo cual, influyó notoriamente en la productividad final de agua [12, 63]. Sin embargo, se estima que el proceso de desorción no se pudo llevar a cabo completamente debido a que la

temperatura durante el proceso de desorción fue muy baja. Finalmente, se evaluó la estabilidad térmica del material P800N bajo ensayos termogravimétricos de 30 a 800 °C, bajo atmosfera de aire, se encontró que la pérdida de masa es inferior al 1% para la temperatura máxima de desorción 28.1 °C. Esta tendencia se mantiene durante 10 ciclos de adsorción/desorción. Así, los resultados obtenidos sugieren una buena sinergia entre el material P800N y el equipo condensador, permitiendo la producción eficiente de agua dulce en condiciones ambientales desafiantes.



**Figura 17.** Condiciones ambientales durante las pruebas de campo con carbón activado P800N.

Además, se llevó a cabo un análisis termogravimétrico durante 10 ciclos de adsorción/desorción. Los resultados evidenciaron que para la máxima temperatura experimentada por el sistema (120°C), el carbón activado P800N mostró una pérdida de masa menor al 6%, cuando la desorción ya se había llevado a cabo completamente. Esto sugiere que los carbones activados sintetizados pueden emplearse a través de múltiples ciclos sin perder eficiencia en las etapas de adsorción/desorción cuando la temperatura de desorción en condiciones ambientales supera los 80 °C.



**Figura 18.** Agua desorbida según análisis termogravimétricos realizados para el carbón activado P800N durante 10 ciclos de adsorción/desorción a presión atmosférica y temperatura final de 120 °C en atmosfera de aire.

Finalmente, se observó que, para temperaturas de desorción bajas, menores a 40 °C, algunas moléculas de agua pueden permanecer adsorbidas en la superficie del material P800N, aumentando la cantidad de agua no desorbida conforme transcurren los ciclos de sorción. Así, es indispensable valorar la inclusión de compuestos catalíticos que permitan la desorción total a temperaturas bajas (<50°C) con el fin de garantizar la reutilización del material sintetizado bajo diversos ciclos de adsorción/desorción.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

El agua es una molécula indispensable en el diario vivir del ser humano. El difícil acceso a agua potable y la contaminación de los recursos hídricos han ocasionado una problemática social y ambiental latente. Así, el principal objetivo de este estudio es la producción de agua dulce utilizando carbones activados obtenidos a partir de residuos PET para hacer frente a esta situación.

Durante la evaluación de adsorción de agua dulce se probaron 8 carbones activados, dos de ellos, comerciales sintetizados a partir de residuos agroindustriales de café y coco, dos carbones activados fueron sintetizados a partir de la transformación termoquímica de residuos de tereftalato de polietileno (PET) a temperaturas de carbonización de 800 y 600°C, los cuatro carbones fueron modificados superficialmente para mejorar la afinidad de los mismos por moléculas polares a través de la oxidación del adsorbente. Los ocho carbones activados fueron caracterizados profundamente a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), adsorción de nitrógeno para determinar el área superficial disponible para la interacción con las moléculas del adsorbato, espectroscopia de fotoemisión de rayos (XPS), espectroscopia Raman y adsorción de nitrógeno. Los resultados mostraron materiales con área superficial de hasta 1313 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup> para aquellos sin acidificación superficial. Mientras que, aquellos modificados superficialmente disminuyeron su área superficial hasta en un 65% para los materiales sintetizados a partir de residuos de café y coco y del 5% para aquellos sintetizados a partir de residuos PET, mostrando una menor estabilidad térmica de los materiales carbonosos sintetizados a partir de residuos agroindustriales. La acidificación superficial de los carbones permitió la exhibición de múltiples grupos oxigenados y nitrogenados lo cual maximizó la interacción con las moléculas de agua a través de la formación de puentes de hidrogeno. Las isothermas de agua sobre los carbones activados a 20, 30 y 40 °C tuvieron un comportamiento tipo III según las clasificaciones IUPAC para todos los materiales, a excepción del carbón activado P800N, el cual, mostro una isoterma tipo I, debido a un aumento en el volumen microporoso durante la acidificación superficial. La máxima capacidad adsortiva fue de 1.55 g·g<sup>-1</sup> para el material P800N para una humedad relativa del 84% y una temperatura de 20 °C. El proceso se puede definir como espontáneo y exotérmico según las propiedades termodinámicas de la sorción. Para las pruebas de

campo se diseñó un prototipo para evaluación en Medellín, Antioquía, Colombia. Durante la prueba de campo, la sorción/captura de agua se realizó durante la noche, mientras que la liberación y producción de agua se produjo durante el día con uso exclusivo de energía solar. La humedad relativa promedio durante la etapa de adsorción fue de 80%, mientras que la velocidad del viento fue de  $2.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y la temperatura fue de  $20.7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Durante la etapa de desorción la temperatura promedio fue de  $26.2^\circ\text{C}$ . La productividad del agua fue igual a  $0.9 \text{ g}$  de agua condensada por  $\text{g}$  de material seco. Estos resultados indican que los materiales sintetizados pueden producir agua de manera eficiente en áreas desafiantes en el marco de una economía circular, contribuyendo a la sostenibilidad y el bienestar social en zonas con alta escases hídrica.

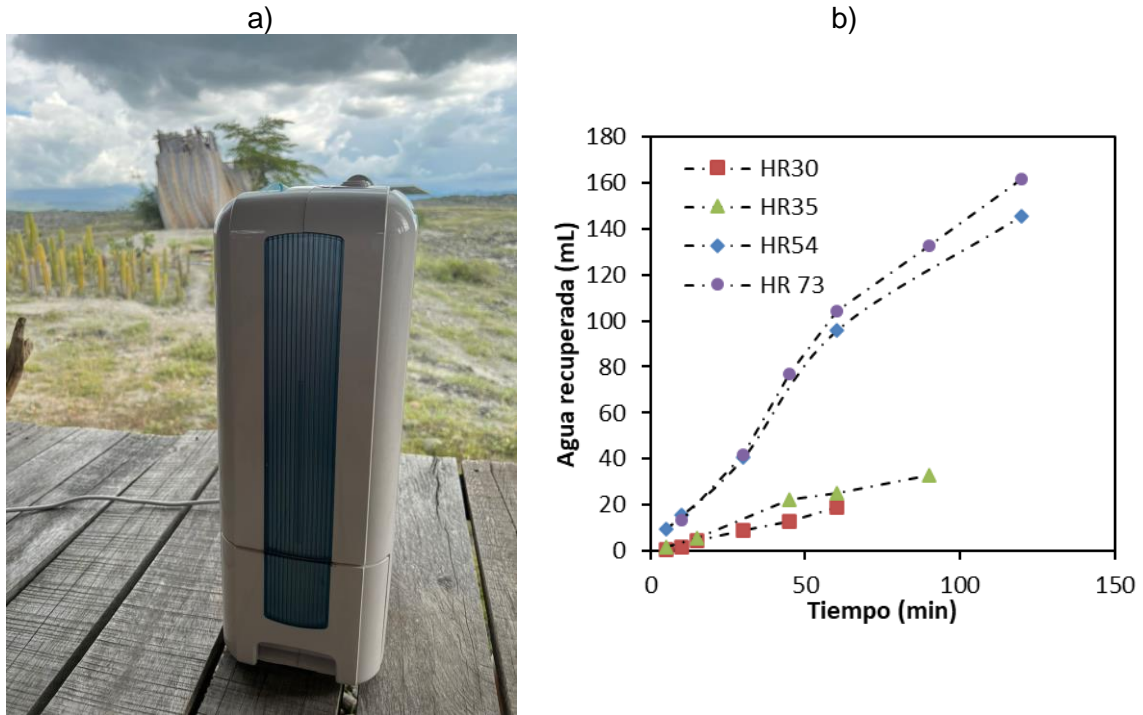
## 5.2. Recomendaciones

1. Se podría evaluar la optimización de la síntesis de los carbones activados a partir de residuos PET variando estratégicamente los parámetros clave, como temperatura final de pirólisis, tiempo y temperatura de degradación del polímero y evaluar nuevos métodos de modificación superficial para aumentar el rendimiento en términos de capacidad adsorptiva, productividad de agua dulce y gasto energético durante el proceso de síntesis.
2. Actualmente, en el mercado existen diferentes grados de PET, incluyendo grado fibra, película o ingeniería, estos se diferencian en su peso molecular. Con esto en mente, se podría evaluar las propiedades fisicoquímicas modificando el PET empleado como precursor de la síntesis de los carbones activados.
3. Es necesario llevar a cabo un análisis fisicoquímico y microbiológico exhaustivo del agua producida a través de la adsorción/desorción de vapor de agua por los carbones activados sintetizados para determinar la potabilidad de esta.
4. Para lograr la masificación de la tecnología es indispensable el diseño de un equipo de producción de agua que permita un mayor flujo másico de vapor de agua y una condensación más rápida del agua desorbida, con el fin de aumentar la oferta total de agua dulce.

Para este último punto se ha realizado una valoración inicial empleando un equipo deshumidificador comercial que emplea dos tecnologías simultáneamente. La primera una rueda deshumidificadora impregnada con material adsorbente, cuya función se establece en aumentar la humedad relativa dentro del sistema por efectos adsorptivos y la segunda, la inclusión del efecto termoeléctrico "Peltier" para condensar el agua desorbida rápida y eficientemente. El dispositivo internamente posee unas aspas para promover el flujo masico de aire a través del sistema.

El equipo se dispuso bajo condiciones ambientales del desierto de la Tatacoa. A lo largo de la prueba se determinó que la velocidad promedio del viento fue de  $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , temperatura de  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  y humedad relativa entre  $0.30$  y  $0.73$ .

El registro fotográfico y las cinéticas de adsorción encontradas se muestran en la Figura 19. Se encontró una capacidad de generación de agua de hasta 160 mL para una humedad relativa de 0.73 y un tiempo de uso de 2 horas. Con la isoterma de adsorción del carbón activado sintetizado P800N se pudo determinar mediante simulación termodinámica que el equipo podría producir 3 veces más agua, en comparación al material comercial, debido a un aumento en la humedad relativa dentro del sistema.



**Figura 19.** a) Montaje experimental equipo deshumidificador ubicado en el desierto de la Tatacoa, Colombia y b) Cinética de condensación de agua para humedades relativas entre 0.3 y 0.7.

Finalmente, durante el transcurso de la prueba en campo se encontró que la disponibilidad de la energía eléctrica indispensable para la utilización del dispositivo deshumidificador en condiciones del desierto de la Tatacoa en Colombia es desafiante, por lo cual, el uso de una fuente sostenible para alimentar el equipo es esencial para su correcta instalación en zonas de alto estrés hídrico, donde la interconectividad a un sistema eléctrico es baja o nula. Además, se observó que el equipo después de 2 horas de uso sufre un proceso de sobrecalentamiento por lo que se hace indispensable la evaluación futura de diferentes equipos que permitan un proceso continuo y sostenible de adsorción /desorción y producción de agua potable.

## A. Productos generados

1. Diseño de un equipo de adsorción/desorción funcional a condiciones ambientales reales de Medellín, Antioquia.
2. Protocolos de síntesis de seis carbones activados sintetizados y/o modificados superficialmente que incrementan la afinidad por moléculas polares.
3. Publicación de un (1) artículo científico con relación a la producción de agua dulce empleando materiales adsorbentes y el equipo de adsorción/desorción diseñado: "Galeano-Caro, Dahiana, et al. "Freshwater production from air dehumidification using novel SiO<sub>2</sub>-based supported material and solar energy: Colombia case study." *Energy Reports* 8 (2022): 3115-3126."
4. Artículo científico en revisión: "Synthesis of activated carbons from the thermochemical transformation of PET waste functionalized with nitric acid for freshwater production"
5. Participación en eventos de difusión científica como: III Encuentro Anual de Sostenibilidad Energética" - SPE Colombia 2023, Concurso técnico del XX Congreso Colombiano de petróleo, gas y energía 2023 y #LatinXChem Twitter Conference 2020-2021.
6. Elegido proyecto financiable durante la convocatoria: "UN INNOVA": Convocatoria de proyectos para el fortalecimiento de la innovación en la universidad nacional de Colombia a partir del desarrollo de prototipos y experiencias piloto 2019-2021 (primera cohorte).
7. Reconocimiento por estar entre los mejores 4 posters en el Concurso técnico del XX Congreso Colombiano de petróleo, gas y energía 2023.
8. Mención honorable en la categoría #LXChemEnv durante la conferencia virtual #LatinXChem 2021.
9. Artículo de difusión científica en el periódico nacional el COLOMBIANO 2020 Titulado: ¿Producir agua dulce en zonas desérticas?
10. Entrevista en RCN Radio 2021 Proyecto: Producción de agua dulce en zonas desérticas a partir de la humedad del ambiente
11. Entrevista en Teleantioquia Noticias #TANoticias 2021 Proyecto: Producción de agua dulce en zonas desérticas a partir de la humedad del ambiente

## Referencias

- [1] W. Musie and G. Gonfa, "Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review," *Heliyon*, 2023.
- [2] M. Roggenburg, D. M. Warsinger, H. B. Evans, and L. Castillo, "Combatting water scarcity and economic distress along the US-Mexico border using renewable powered desalination," *Applied Energy*, vol. 291, p. 116765, 2021.
- [3] J. Bundschuh, N. Ghaffour, H. Mahmoudi, M. Goosen, S. Mushtaq, and J. Hoinkis, "Low-cost low-enthalpy geothermal heat for freshwater production: Innovative applications using thermal desalination processes," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 43, pp. 196-206, 2015.
- [4] G. Chen, "Electrochemical technologies in wastewater treatment," *Separation and purification Technology*, vol. 38, pp. 11-41, 2004.
- [5] J. W. Patterson, "Industrial wastewater treatment technology," 1985.
- [6] J. Ji, R. Wang, and L. Li, "New composite adsorbent for solar-driven fresh water production from the atmosphere," *Desalination*, vol. 212, pp. 176-182, 2007.
- [7] J. Wang, J. Liu, R. Wang, and L. Wang, "Experimental research of composite solid sorbents for fresh water production driven by solar energy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 121, pp. 941-950, 2017.
- [8] S.-I. Kim, T.-U. Yoon, M.-B. Kim, S.-J. Lee, Y. K. Hwang, J.-S. Chang, *et al.*, "Metal-organic frameworks with high working capacities and cyclic hydrothermal stabilities for fresh water production," *Chemical Engineering Journal*, vol. 286, pp. 467-475, 2016.
- [9] C. Y. Tso and C. Y. Chao, "Activated carbon, silica-gel and calcium chloride composite adsorbents for energy efficient solar adsorption cooling and dehumidification systems," *International journal of refrigeration*, vol. 35, pp. 1626-1638, 2012.
- [10] J. Wang, R. Wang, L. Wang, and J. Liu, "A high efficient semi-open system for fresh water production from atmosphere," *Energy*, vol. 138, pp. 542-551, 2017.
- [11] A. J. Rieth, S. Yang, E. N. Wang, and M. Dincă, "Record atmospheric fresh water capture and heat transfer with a material operating at the water uptake reversibility limit," *ACS central science*, vol. 3, pp. 668-672, 2017.
- [12] F. Fathieh, M. J. Kalmutzki, E. A. Kapustin, P. J. Waller, J. Yang, and O. M. Yaghi, "Practical water production from desert air," *Science advances*, vol. 4, p. eaat3198, 2018.
- [13] L. G. Gordeeva, M. V. Solovyeva, A. Sapienza, and Y. I. Aristov, "Potable water extraction from the atmosphere: Potential of MOFs," *Renewable energy*, vol. 148, pp. 72-80, 2020.
- [14] B. H. Blanca, T. D. Y. Azucena, and L. T. Adriana, "Utilización de residuos agroindustriales," *Revista sistemas ambientales*, vol. 2, pp. 44-50, 2008.

- [15] J. M. Sierra González and D. S. Valbuena Rojas, "Diseño de una mezcla entre material granular y borras petroleras para uso como capa Granular en una estructura de vía."
- [16] J. Rouquerol, P. Llewellyn, and F. Rouquerol, "Is the BET equation applicable to microporous adsorbents," *Stud. Surf. Sci. Catal*, vol. 160, pp. 49-56, 2007.
- [17] G. A. Perdomo, "Plásticos y medio ambiente," *Revista iberoamericana polimeros*, vol. 3, pp. 1-13, 2002.
- [18] L. Liu, S. J. Tan, T. Horikawa, D. Do, D. Nicholson, and J. Liu, "Water adsorption on carbon-A review," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 250, pp. 64-78, 2017.
- [19] H. Furukawa, F. Gandara, Y.-B. Zhang, J. Jiang, W. L. Queen, M. R. Hudson, *et al.*, "Water adsorption in porous metal-organic frameworks and related materials," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 136, pp. 4369-4381, 2014.
- [20] J. Wang, R. Wang, and L. Wang, "Water vapor sorption performance of ACF-CaCl<sub>2</sub> and silica gel-CaCl<sub>2</sub> composite adsorbents," *Applied thermal engineering*, vol. 100, pp. 893-901, 2016.
- [21] X. Li, X. Chen, and Z. Li, "Adsorption equilibrium and desorption activation energy of water vapor on activated carbon modified by an oxidation and reduction treatment," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 55, pp. 3164-3169, 2010.
- [22] H. Huang, T. Oike, F. Watanabe, Y. Osaka, N. Kobayashi, and M. Hasatani, "Development research on composite adsorbents applied in adsorption heat pump," *Applied thermal engineering*, vol. 30, pp. 1193-1198, 2010.
- [23] R. K. Liew, E. Azwar, P. N. Y. Yek, X. Y. Lim, C. K. Cheng, J.-H. Ng, *et al.*, "Microwave pyrolysis with KOH/NaOH mixture activation: a new approach to produce micro-mesoporous activated carbon for textile dye adsorption," *Bioresource technology*, vol. 266, pp. 1-10, 2018.
- [24] S. Lv, C. Li, J. Mi, and H. Meng, "A functional activated carbon for efficient adsorption of phenol derived from pyrolysis of rice husk, KOH-activation and EDTA-4Na-modification," *Applied Surface Science*, vol. 510, p. 145425, 2020.
- [25] I. I. Salame and T. J. Badosz, "Study of water adsorption on activated carbons with different degrees of surface oxidation," *Journal of colloid and interface science*, vol. 210, pp. 367-374, 1999.
- [26] O. Talu and F. Meunier, "Adsorption of associating molecules in micropores and application to water on carbon," *AIChE journal*, vol. 42, pp. 809-819, 1996.
- [27] S. Brunauer, P. H. Emmett, and E. Teller, "Adsorption of gases in multimolecular layers," *Journal of the American chemical society*, vol. 60, pp. 309-319, 1938.
- [28] S. J. Gregg, K. S. W. Sing, and H. Salzberg, "Adsorption surface area and porosity," *Journal of The electrochemical society*, vol. 114, p. 279Ca, 1967.
- [29] C. Nguyen and D. Do, "The Dubinin-Radushkevich equation and the underlying microscopic adsorption description," *Carbon*, vol. 39, pp. 1327-1336, 2001.
- [30] A. Esfandiari, T. Kaghazchi, and M. Soleimani, "Preparation and evaluation of activated carbons obtained by physical activation of polyethyleneterephthalate (PET) wastes," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 43, pp. 631-637, 2012.
- [31] A. Ramirez, S. Giraldo, M. Ulloa, E. Flórez, and N. Acelas, "Production and characterization of activated carbon from wood wastes," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, p. 012012.
- [32] M. Olam, "Production of activated carbon from waste PET'chars," *Int J Environ Monit Anal*, vol. 10, p. 39, 2022.

- [33] E. Ali, K. Tahereh, and S. Mansooreh, "Preparation of high surface area activated carbon from polyethylene terephthalate (PET) waste by physical activation," *Research Journal of Chemistry and Environment*, vol. 15, pp. 433-437, 2011.
- [34] D. Hernández-Monje, L. Giraldo, and J. Moreno-Piraján, "Estudio entálpico de la inmersión de carbones activados granulares modificados en benceno, hexano y ciclohexano," *Afinidad*, vol. 73, 2016.
- [35] J. Fu, J. Zhang, C. Jin, Z. Wang, T. Wang, X. Cheng, *et al.*, "Effects of temperature, oxygen and steam on pore structure characteristics of coconut husk activated carbon powders prepared by one-step rapid pyrolysis activation process," *Bioresource technology*, vol. 310, p. 123413, 2020.
- [36] P. Carrott and K. Sing, "Assessment of microporosity," in *Studies in Surface Science and Catalysis*. vol. 39, ed: Elsevier, 1988, pp. 77-87.
- [37] K. Sing, "The use of nitrogen adsorption for the characterisation of porous materials," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 187, pp. 3-9, 2001.
- [38] J. Singh, H. Bhunia, and S. Basu, "Adsorption of CO<sub>2</sub> on KOH activated carbon adsorbents: Effect of different mass ratios," *Journal of environmental management*, vol. 250, p. 109457, 2019.
- [39] J. Choma, J. Jagiello, and M. Jaroniec, "Assessing the contribution of micropores and mesopores from nitrogen adsorption on nanoporous carbons: Application to pore size analysis," *Carbon*, vol. 183, pp. 150-157, 2021.
- [40] W. Bratek, A. Świątkowski, M. Pakuła, S. Biniak, M. Bystrzejewski, and R. Szmigielski, "Characteristics of activated carbon prepared from waste PET by carbon dioxide activation," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 100, pp. 192-198, 2013.
- [41] N. Kartel', N. Gerasimenko, N. Tsyba, A. Nikolaichuk, and G. Kovtun, "Synthesis and study of carbon sorbent prepared from polyethylene terephthalate," *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 74, pp. 1765-1767, 2001.
- [42] M. Domingo-García, J. Fernández, M. Almazán-Almazán, F. López-Garzón, F. Stoeckli, and T. Centeno, "Poly (ethylene terephthalate)-based carbons as electrode material in supercapacitors," *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 3810-3813, 2010.
- [43] C. Rodríguez Correa, M. Stollovsky, T. Hehr, Y. Rauscher, B. Rolli, and A. Kruse, "Influence of the carbonization process on activated carbon properties from lignin and lignin-rich biomasses," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 5, pp. 8222-8233, 2017.
- [44] M. Dizbay-Onat, U. K. Vaidya, and C. T. Lungu, "Preparation of industrial sisal fiber waste derived activated carbon by chemical activation and effects of carbonization parameters on surface characteristics," *Industrial crops and products*, vol. 95, pp. 583-590, 2017.
- [45] C. Reyes Guzmán, F. Carrillo Pedroza, and S. Castillo, "Oxidación de cianuro en disolución acuosa mediante ozonización en presencia de carbón activado modificado," 2013.
- [46] X. Chen, X. Wang, and D. Fang, "A review on C1s XPS-spectra for some kinds of carbon materials," *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, vol. 28, pp. 1048-1058, 2020.
- [47] K. Nakagawa, H. Tamon, T. Suzuki, and S. Nagano, "Improvement of mesoporosity of activated carbons from PET by novel pre-treatment for steam activation," in *Adsorption Science And Technology*, ed: World Scientific, 2000, pp. 456-460.

- [48] J. Boudou, A. Martinez-Alonzo, and J. Tascon, "Introduction of acidic groups at the surface of activated carbon by microwave-induced oxygen plasma at low pressure," *Carbon*, vol. 38, pp. 1021-1029, 2000.
- [49] B. Strzemiescka, A. Voelkel, J. Donate-Robles, and J. M. Martín-Martínez, "Assessment of the surface chemistry of carbon blacks by TGA-MS, XPS and inverse gas chromatography using statistical chemometric analysis," *Applied surface science*, vol. 316, pp. 315-323, 2014.
- [50] A. E. Serrano, "Síntesis y caracterización de materiales híbridos carbonosos dopados con nitrógeno para la aplicación en pilas de combustible."
- [51] J. J. Ternero-Hidalgo, J. Palomo, J. Rodríguez-Mirasol, J. A. Cordero, and J. M. Rosas, "Influencia de la presencia de compuestos superficiales de P sobre la funcionalización de carbones activos con HNO<sub>3</sub>," 2015.
- [52] O. E. Medina, J. Gallego, A. F. Perez-Cadenas, F. Carrasco-Marin, F. B. Cortés, and C. A. Franco, "Insights into the morphology effect of ceria on the catalytic performance of NiO–PdO/CeO<sub>2</sub> nanoparticles for thermo-oxidation of n-C<sub>7</sub> asphaltenes under isothermal heating at different pressures," *Energy & Fuels*, vol. 35, pp. 18170-18184, 2021.
- [53] A. Puziy, O. Poddubnaya, R. Socha, J. Gurgul, and M. Wisniewski, "XPS and NMR studies of phosphoric acid activated carbons," *Carbon*, vol. 46, pp. 2113-2123, 2008.
- [54] P. Burg, P. Fydrych, D. Cagniant, G. Nanse, J. Bimer, and A. Jankowska, "The characterization of nitrogen-enriched activated carbons by IR, XPS and LSER methods," *Carbon*, vol. 40, pp. 1521-1531, 2002.
- [55] W. Kiciński, M. Norek, and M. Bystrzejewski, "Monolithic porous graphitic carbons obtained through catalytic graphitization of carbon xerogels," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 74, pp. 101-109, 2013.
- [56] B. Kishore, D. Shanmugasundaram, T. R. Penki, and N. Munichandraiah, "Coconut kernel-derived activated carbon as electrode material for electrical double-layer capacitors," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 44, pp. 903-916, 2014.
- [57] L. D. Ramírez Valencia, "Obtención de materiales carbonosos a partir de la cascarilla de cacao para su aplicación como electrodos en supercapacitores," 2018.
- [58] B. Huang, G. Liu, P. Wang, X. Zhao, and H. Xu, "Effect of nitric acid modification on characteristics and adsorption properties of lignite," *Processes*, vol. 7, p. 167, 2019.
- [59] A. Slasli, M. Jorge, F. Stoeckli, and N. Seaton, "Water adsorption by activated carbons in relation to their microporous structure," *Carbon*, vol. 41, pp. 479-486, 2003.
- [60] F. Carrasco-Marin, A. Mueden, T. A. Centeno, F. Stoeckli, and C. Moreno-Castilla, "Water adsorption on activated carbons with different degrees of oxidation," *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, vol. 93, pp. 2211-2215, 1997.
- [61] E. A. Tabora, C. A. F. Ariza, W. A. Jurado, N. N. Nassar, and F. B. Cortés, "Effects of glycerol on the minimization of water readsorption on sub-bituminous coal," *Drying Technology*, vol. 35, pp. 249-260, 2017.
- [62] M. OMAÑA, F. CORTES, C. ISÁZA, and A. GARCÍA, "SORPTION ISOTHERMS OF WATER IN ORANGE JUICE EXTRACTION RESIDUES," *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 8, pp. 61-67, 2010.
- [63] D. Galeano-Caro, A. A. Rios, F. Chejne, C. Moreno-Castilla, A. Pérez-Cadenas, F. Carrasco-Marin, *et al.*, "Freshwater production from air dehumidification using novel SiO<sub>2</sub>-based supported material and solar energy: Colombia case study," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3115-3126, 2022.

- [64] J. Rouquerol, F. Rouquerol, P. Llewellyn, G. Maurin, and K. S. Sing, *Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications*: Academic press, 2013.
- [65] M. s. L. Pinto, A. S. Mestre, A. P. Carvalho, and J. o. Pires, "Comparison of methods to obtain micropore size distributions of carbonaceous materials from CO<sub>2</sub> adsorption based on the Dubinin– Radushkevich isotherm," *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 49, pp. 4726-4730, 2010.
- [66] C. S. de Castro, L. N. Viau, J. T. Andrade, T. A. P. Mendonça, and M. Gonçalves, "Mesoporous activated carbon from polyethyleneterephthalate (PET) waste: pollutant adsorption in aqueous solution," *New Journal of Chemistry*, vol. 42, pp. 14612-14619, 2018.
- [67] J. Alcañiz-Monge, A. Linares-Solano, and B. Rand, "Water adsorption on activated carbons: study of water adsorption in micro-and mesopores," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 105, pp. 7998-8006, 2001.
- [68] F. B. Cortes Correa, "Adsorción de agua en materiales compuestos y en zeolita," *Facultad de Minas*, 2009.
- [69] M. R. Basila, "Hydrogen bonding interaction between adsorbate molecules and surface hydroxyl groups on silica," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 35, pp. 1151-1158, 1961.
- [70] W. Hertl and M. Hair, "Adsorption of water on silica," *Nature*, vol. 223, pp. 1150-1151, 1969.
- [71] M. D. Donohue and G. L. Aranovich, "Classification of Gibbs adsorption isotherms," *Advances in colloid and interface science*, vol. 76, pp. 137-152, 1998.
- [72] H. ShamsiJazeyi and T. Kaghazchi, "Investigation of nitric acid treatment of activated carbon for enhanced aqueous mercury removal," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 16, pp. 852-858, 2010.
- [73] J. Zawadzki, M. Wiśniewski, and K. Skowrońska, "Heterogeneous reactions of NO<sub>2</sub> and NO–O<sub>2</sub> on the surface of carbons," *Carbon*, vol. 41, pp. 235-246, 2003.
- [74] G. Quezada, J. Saavedraa, and R. R. P. Toledoa, "SIMULACION MOLECULAR DE POLIACRILAMIDA ANIONICA EN PRESENCIA DE SALES."
- [75] L. E. R. D. Mirón and M. E. L. Magaña, "¿ Qué sabemos del agua?."
- [76] A. Ramírez, L. G. Navarro, and J. Conde Acevedo, "Degradación química del poli (etilen tereftalato)," *Revista Colombiana de Química*, vol. 39, pp. 321-331, 2010.
- [77] R. Agarwal, J. Noh, J. Schwarz, and P. Davini, "Effect of surface acidity of activated carbon on hydrogen storage," *Carbon*, vol. 25, pp. 219-226, 1987.
- [78] J. Nishino, "Adsorption of water vapor and carbon dioxide at carboxylic functional groups on the surface of coal," *Fuel*, vol. 80, pp. 757-764, 2001.
- [79] T. Ohba, H. Kanoh, and K. Kaneko, "Structures and stability of water nanoclusters in hydrophobic nanospaces," *Nano letters*, vol. 5, pp. 227-230, 2005.
- [80] E. W. Bittner, M. R. Smith, and B. C. Bockrath, "Characterization of the surfaces of single-walled carbon nanotubes using alcohols and hydrocarbons: a pulse adsorption technique," *Carbon*, vol. 41, pp. 1231-1239, 2003.
- [81] M. Hernández-Rodríguez, A. Otero-Calvis, J. Falcón-Hernández, and Y. Yperman, "Características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO<sub>3</sub>," *Revista Cubana de Química*, vol. 29, pp. 26-38, 2017.
- [82] P. D. Húmpola, "Estudio de la adsorción de compuestos biorrefractarios en soluciones acuosas," 2013.

- [83] W. Ma, L. Zhang, and C. Yang, "Discussion of the applicability of the generalized Clausius–Clapeyron equation and the frozen fringe process," *Earth-Science Reviews*, vol. 142, pp. 47-59, 2015.
- [84] G. Domínguez, R. Hernández-Huesca, and G. Aguilar-Armenta, "Isosteric heats of adsorption of N<sub>2</sub>O and NO on natural zeolites," *Journal of the Mexican Chemical Society*, vol. 54, pp. 111-116, 2010.
- [85] A. Ayala Aponte, L. Serna Cock, and G. Rodríguez de la Pava, "Moisture adsorption isotherms in yellow pitahaya (*Selenicereus megalanthus*)," *Dyna*, vol. 78, pp. 7-14, 2011.
- [86] F. B. CORTÉS, A. BETANCOURT, B. ROJANO, V. LÓPEZ, and E. Arenas, "Evaluación de las propiedades termodinámicas de sorción de la uchuva (*Physalis peruviana* L.)," *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 10, pp. 32-41, 2012.
- [87] D. Shen, M. Bülow, F. Siperstein, M. Engelhard, and A. L. Myers, "Comparison of experimental techniques for measuring isosteric heat of adsorption," *Adsorption*, vol. 6, pp. 275-286, 2000.
- [88] D. P. ASCHERI and S. BASTOS, "Propiedades de adsorción de agua de dos genotipos de arroz rojo," *Engenharia Agrícola*, vol. 35, pp. 134-143, 2015.
- [89] T. Horikawa, Y. Zeng, D. Do, K.-I. Sotowa, and J. R. A. Avila, "On the isosteric heat of adsorption of non-polar and polar fluids on highly graphitized carbon black," *Journal of colloid and interface science*, vol. 439, pp. 1-6, 2015.
- [90] M. Dubinin, "Water vapor adsorption and the microporous structures of carbonaceous adsorbents," *Carbon*, vol. 18, pp. 355-364, 1980.
- [91] E. A. Tabora-Acevedo, W. J. Jurado, and F. B. Cortés, "Efecto de la temperatura en el proceso de adsorción de agua en Carbón sub-bituminoso colombiano," *Boletín de Ciencias de la Tierra*, pp. 57-64, 2016.
- [92] P. Leuk, M. Schneeberger, U. Hirn, and W. Bauer, "Heat of sorption: a comparison between isotherm models and calorimeter measurements of wood pulp," *Drying technology*, vol. 34, pp. 563-573, 2016.