

INDICE

Editorial	1
Entrevista a Rosa Menéndez López	2
De residuo a recurso: recuperación de una fracción rica en estireno a partir del aceite de pirólisis de palas de aerogenerador.....	4
FLEXBY: Cómo del carbono contenido en los residuos de biomasa nacen los combustibles y materiales del futuro mediante pirólisis por microondas	12
Puntos cuánticos de carbono: síntesis mediante metodología accesible.....	18
5ª Escuela Internacional de Verano sobre Carbono y Nanomateriales Relacionados: del espacio a la Tierra y de vuelta al espacio	22
Curso: El Carbono y sus Materiales, Caracterización y Aplicaciones.....	24
III Jornadas de Jóvenes Investigadores del Grupo Español del Carbón	26
In Memoriam	27

Editores Jefe:

Juana María Rosas Martínez
Universidad de Málaga

José Luis Pinilla Ibarz
Instituto de Carboquímica (CSIC)

Editores:

Víctor Karim Abdelkader Fernández

Universidad de Granada

Noelia Alonso Morales

Universidad Autónoma de Madrid

Raúl Berenguer Betrián

Universidad de Alicante

Francisco Heras Muñoz

Universidad Autónoma de Madrid

Victoria García Rocha

(INCAR-CSIC)

Fabián Suárez García

Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (CSIC)

Editorial

Os presentamos el número 81 del Boletín del Grupo Español del Carbón, que reúne nuevas contribuciones científicas, artículos de divulgación y actividades de formación, junto con el reconocimiento a quienes han contribuido al desarrollo de nuestra comunidad.

Abrimos este número con una entrevista a Rosa Menéndez López, quien inauguró esta sección en septiembre de 2020 y vuelve ahora a nuestras páginas con motivo de su reciente jubilación. Presidenta del GEC entre 2003 y 2011 y del CSIC entre 2017 y 2022, Rosa comparte recuerdos y reflexiones sobre su trayectoria, así como su visión del Grupo como espacio de encuentro entre generaciones de investigadores. Desde el equipo editorial le deseamos que disfrute de esta nueva etapa y esperamos seguir contando con su cercanía y participación en las actividades de nuestra comunidad.

En la sección de artículos científicos, investigadores del Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC), en colaboración con Acciona Construcción, presentan un trabajo sobre la recuperación de una fracción rica en estireno a partir del aceite de pirólisis de palas de aerogenerador. Esta contribución aborda el aprovechamiento de un residuo de difícil reciclaje y muestra el interés de combinar procesos de transformación termoquímica y separación para recuperar compuestos con potencial de reutilización en la industria química.

En el ámbito de la divulgación, contamos con una contribución dedicada al proyecto europeo FLEXBY, con participación del Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR-CSIC), junto con otras entidades. El artículo presenta una propuesta de valorización de residuos de biomasa mediante pirólisis asistida por microondas, que integra la hidroxigenación de la fracción líquida sin aporte externo de hidrógeno y el aprovechamiento de la fracción sólida para la preparación de materiales de carbono y de la gaseosa para la producción de hidrógeno.

Javier Hernández Ferrer, del ICB-CSIC, presenta una metodología accesible a toda la sociedad dedicada a la síntesis de puntos cuánticos de carbono. El trabajo acerca al lector a estos nanomateriales y a sus propiedades, mostrando las posibilidades de abordar su preparación con procedimientos sencillos y de interés para la divulgación y la enseñanza.

En el ámbito de la formación, recogemos la reseña de la quinta edición de la International Summer School on Carbon and Related Nanomaterials, celebrada en Jaca el pasado mes de julio y dirigida por Raúl Arenal y Wolfgang Maser. El encuentro permitió compartir conocimientos sobre la síntesis, caracterización y aplicaciones de las nanoestructuras de carbono, favoreciendo el intercambio entre estudiantes, jóvenes investigadores y especialistas.

A continuación, volvemos a incluir la información sobre el curso «El Carbono y sus Materiales, Caracterización y Aplicaciones», que se celebrará en la sede Antonio Machado de la Universidad Internacional de Andalucía, en Baeza, y sobre las III Jornadas de Jóvenes Investigadores del Grupo Español del Carbón, que tendrán lugar en la misma ciudad. Con la proximidad de ambas citas, previstas para el próximo mes de noviembre, os animamos a participar en estas actividades, que ofrecen una oportunidad para ampliar conocimientos, compartir resultados y reforzar los vínculos entre los miembros de nuestra comunidad.

Cerramos este número con un homenaje al profesor Vicente Gómez Serrano, fallecido el pasado mes de mayo. La semblanza escrita por María F. Alexandre Franco recorre su trayectoria en la Universidad de Extremadura, sus contribuciones al estudio de los materiales carbonosos y su estrecha vinculación con el GEC. Sus palabras nos acercan también a su dimensión humana y familiar. Desde estas páginas nos sumamos a su recuerdo con afecto y gratitud, y trasladamos nuestro cariño a su familia, compañeros y amigos.

Desde el equipo editorial agradecemos a todos los autores y autoras su contribución a este número. Os invitamos a seguir enviando vuestros trabajos, reseñas, noticias y propuestas para que el Boletín continúe siendo un punto de encuentro entre investigadores, estudiantes, técnicos y profesionales vinculados a la ciencia y la tecnología de los materiales de carbono, con sus diversas aplicaciones energéticas, medioambientales e industriales.

José Luis Pinilla
Juana María Rosas

@GecBulletin



@GrupoCarbon



Boletín del Grupo Español del Carbón



Entrevistamos a ...



En este número del Boletín tenemos el placer de volver a entrevistar a Rosa Menéndez López, quien inauguró esta sección en septiembre de 2020. Presidenta del Grupo Español del Carbón entre 2003 y 2011 y del CSIC entre 2017 y 2022, Rosa ha mantenido una estrecha vinculación con nuestra comunidad científica, forjando vínculos de colaboración y amistad que perduran hasta hoy. Su carrera investigadora se ha desarrollado en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR-CSIC), del que fue directora entre 2003 y 2008, con contribuciones al estudio del carbón y sus derivados y al desarrollo de materiales de carbono, como el grafeno. Recientemente jubilada, regresa a estas páginas para compartir sus recuerdos, reflexionar sobre su trayectoria y destacar el papel del GEC como espacio de encuentro entre generaciones de investigadores. Desde estas páginas le deseamos que disfrute de esta nueva etapa. Echaremos de menos su presencia en el día a día de nuestra comunidad científica y esperamos seguir contando con su cercanía y sus aportaciones al Boletín.

Rosa, tras una trayectoria tan intensa y recientemente jubilada, ¿cómo estás viviendo esta nueva etapa? ¿Se mira la carrera científica de otra manera cuando una toma algo de distancia?

Mi nueva etapa, de momento, mucho más relajada. Mi visión de la carrera científica no ha cambiado desde esta nueva situación. Para mí sigue siendo la opción óptima en mi vida profesional y personal. Creo que no me equivoqué. Esto no quiere decir que no recuerde los momentos más duros y difíciles pero los buenos compensan con creces. No es una carrera fácil, pero si tuviese que volver a mis inicios tomaría la misma decisión, repetiría. Te queda la sensación de haber sido útil a la sociedad en el más amplio sentido de la palabra, lo que para mí es muy importante.

Has recibido numerosos premios y reconocimientos a lo largo de tu carrera, y en 2021 Oviedo puso tu nombre a una calle. ¿Qué significó para ti este reconocimiento, especialmente viniendo de una ciudad tan ligada a tu vida personal y profesional?

Sinceramente, nunca me hubiese imaginado tener una calle en Oviedo con mi nombre, y menos verlo con mis propios ojos. Es un auténtico honor a nivel personal, pero yendo un poco más allá, creo que también es muy importante para este gran colectivo que constituimos los científicos. Y máxime teniendo un origen “carbonero”. Hemos evolucionado con los tiempos y las necesidades y nuestra actividad ha tenido su impacto y perdura.

También sabemos que el premio “Mujer Prestosa 2025”, concedido por Mujeres de Empresa para reconocer a mujeres asturianas que inspiran y contribuyen a visibilizar el talento femenino, te hizo especial ilusión. ¿Qué tuvo este reconocimiento para que lo vivieras de una forma tan cercana y emotiva?

Todos los reconocimientos son dignos de agradecimiento. El de “Mujer Prestosa” es entrañable por la cercanía y el propio significado que tiene la palabra “prestosa” para los asturianos. Soy muy de mi tierra, del verde, las montañas y el mar, que muchas veces también se muestra de color verde. El hecho de que lo conceda una asociación de mujeres empresarias, tiene un valor añadido.

Mirando hacia atrás, ¿cuál dirías que ha sido el logro profesional o científico del que te sientes más orgullosa?

Es difícil seleccionar porque creo que mi vida ha sido la suma de muchas pequeñas cosas. Científicamente, diría que el haber sabido evolucionar y renacer

en momentos en que las líneas que marcaban mis estrategias se extinguían o perdían el interés. Me siento orgullosa de aquella extrografía para la caracterización de los derivados del carbón de los inicios, de los estudios sobre la mesofase que fueron fundamentales para el diseño futuro de los materiales de carbono, de haber abierto la fructífera línea del grafeno por vía química..... Sin olvidar la petrografía como herramienta para la mejora de los procesos de conversión del carbón que, además del aporte científico, representó una fuente importante de ingresos a través de proyectos europeos.

Tu carrera científica ha estado profundamente ligada al INCAR. Fuiste directora del Instituto entre 2003 y 2008, una etapa que a menudo recuerdas con orgullo. ¿Qué significó para ti dirigir el INCAR y qué destacarías de aquellos años?

Era razonablemente joven y tenía muchas ganas de hacer cosas por el Instituto. Tenía experiencia en gestión de proyectos europeos y comisiones del CSIC y del Ministerio, lo que fue de gran ayuda a la hora de movilizar recursos a nivel de infraestructuras y personal. Había sido vicedirectora con Jesús Pajares, lo que me permitió conocer de mano los entresijos de la gestión. No obstante, para mí lo más relevante es que, además de un buen equipo de dirección, contaba con el apoyo de mis compañeros, de todo el personal, que contribuía activamente y se implicaba. La reforma integral del INCAR no se hubiese logrado de otra manera. Sin olvidar un gerente que conocía muy bien los entresijos de la administración.

Además de una trayectoria científica muy destacada, has desarrollado una intensa carrera de gestión, llegando a presidir el CSIC. ¿Qué aspectos destacarías de esa etapa institucional? ¿Qué aprendiste de la gestión científica que no se aprende en el laboratorio?

Para poder gestionar algo es muy importante conocer por dentro lo que vas a gestionar. Mi trabajo previo a ser presidenta me dio una experiencia que fue de gran ayuda para afrontar los retos que se me planteaban. ¿Qué aprendí?, que es muy importante rodearte de un buen equipo en el que puedas confiar y delegar, no tener miedo a que sean mejores que tú, porque ahí radica el secreto, es una suma. Aprendí que hay factores externos que se escapan a tu campo de actuación y la ralentizan, y que nuestro país necesita una revisión profunda de la administración general del estado que le permita una mayor agilidad y mejore su competitividad. Pero lo más importante de todo fue la interacción con científicos de muy distintas disciplinas y el espíritu de colaboración en los momentos más difíciles, como fue el caso de la pandemia o el volcán de la Palma. Fue una lección de aprendizaje diaria.

Has desarrollado tu carrera en una época en la que las mujeres encontraban muchas más dificultades para consolidarse en el mundo científico. ¿Qué les dirías hoy a las chicas jóvenes que sienten interés por la ciencia, pero que quizá dudan de si ese camino es para ellas?

A las jóvenes yo les diría que, si sienten el gusanillo de la investigación, que no lo duden y que arremetan la carrera científica con ilusión. El recorrido es largo y con dificultades, pero si lo enfrentas con ilusión no hay nada insalvable. Te permite colaborar con gente de muy distintos países y culturas, viajar, tienes una segunda gran familia, porque además se crean vínculos de amistad. Trabajar en aquello que realmente te gusta es lo mejor que te puede ocurrir en tu vida, y más sabiendo que estas contribuyendo a la resolución de problemas, aportando tu granito de arena a la sociedad.

Fuiste presidenta del Grupo Español del Carbón y has estado siempre muy vinculada a nuestra comunidad. ¿Qué significó para ti aquella etapa y qué papel crees que debe seguir desempeñando el GEC como punto de encuentro entre distintas generaciones de investigadores e investigadoras en materiales de carbono?

La etapa de la presidencia del GEC fue simplemente preciosa. Trabajábamos todo el equipo codo con codo de forma muy integrada y efectiva, y con gran proyección internacional a través de la ECA (European Carbon Association). Baste decir que mis compañeros de aquella época siguen siendo mis amigos. A diferencia de otras asociaciones, que van debilitándose o incluso desapareciendo, el GEC sigue creciendo y cuenta en la actualidad con un nutrido grupo de científicos jóvenes que a mi entender garantizan su continuidad. La permanencia del GEC es fundamental porque favorece la interacción y colaboración de distintas universidades, centros de investigación y empresas con un interés común.

Después de tantos años de ciencia, gestión, viajes, reuniones, proyectos, tesis y reconocimientos, ¿qué es lo que más te sigue ilusionando cuando hablas de ciencia?

Mirar a los jóvenes que se implican con ilusión porque ellos representan el futuro. El ver que la ciencia ha colaborado y sigue contribuyendo a resolver los problemas de nuestra sociedad, aunque a veces no de respuestas a la velocidad que se demanda.

From waste to resource: recovery of a styrene-rich fraction from wind turbine blade pyrolysis oil

De residuo a recurso: recuperación de una fracción rica en estireno a partir del aceite de pirólisis de palas de aerogenerador

Fausto Viteri¹, María Soledad Callén¹, José Manuel López¹, Araceli Gálvez², Alberto Sánchez², Ramón Murillo¹, Tomás García¹

¹ Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC), Miguel Luesma Castán 4, 50018 Zaragoza, España.

² Acciona Construcción S.A., Valportillo Segunda 8, 28108, Madrid, España

fviteri@icb.csic.es

Resumen

Las palas de aerogenerador están constituidas por materiales compuestos en los que fibras de refuerzo, resinas termoestables y otros componentes permanecen íntimamente unidos. Esta estructura proporciona excelentes propiedades mecánicas durante su vida útil, pero dificulta considerablemente su reciclaje. La pirólisis constituye una alternativa para descomponer la matriz polimérica y recuperar diferentes productos sólidos, líquidos y gaseosos. Entre ellos, el aceite de pirólisis puede contener compuestos aromáticos de interés, como el estireno, cuya recuperación permitiría avanzar desde una valorización exclusivamente energética hacia una valorización química. En este trabajo se describe la destilación de un aceite procedente de la pirólisis de palas de aerogenerador, fraccionando el destilado en diferentes intervalos de recogida y evaluando distintas relaciones de reflujo para obtener una fracción enriquecida en estireno. En la condición más favorable, la concentración de estireno aumentó desde el 22,34 hasta el 75,85 % en peso. Sin embargo, la presencia de un 17,50 % de etilbenceno limitó la pureza final alcanzada. Los resultados muestran el potencial de la destilación como etapa inicial de concentración y ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar estrategias complementarias para separar compuestos de volatilidad similar.

1. Introducción

1.1. El final de vida de las palas eólicas

La transición hacia un modelo energético con menores emisiones de carbono ha impulsado notablemente la instalación de fuentes de energía renovable en las últimas décadas. Sin embargo, su desarrollo también debe considerar la gestión de los materiales empleados en sus infraestructuras cuando alcanzan el final de su vida útil. Desde la perspectiva de la economía circular, no basta con producir energía renovable, sino que resulta necesario mantener durante el mayor tiempo posible el valor de los productos, materiales y recursos, reduciendo tanto la generación de residuos como la dependencia de materias primas vírgenes [1].

En el ámbito de la energía eólica, las palas constituyen uno de los componentes más difíciles de gestionar al final de su vida útil. Un estudio ampliamente citado estimó que los residuos acumulados de palas podrían alcanzar alrededor de 43 millones de toneladas a escala mundial en 2050 [2]. Aunque esta previsión depende de la evolución de la potencia instalada, la vida útil de los aerogeneradores y las estrategias de repotenciación, pone de manifiesto la necesidad de desarrollar alternativas de tratamiento técnica y económicamente viables. A diferencia de otros

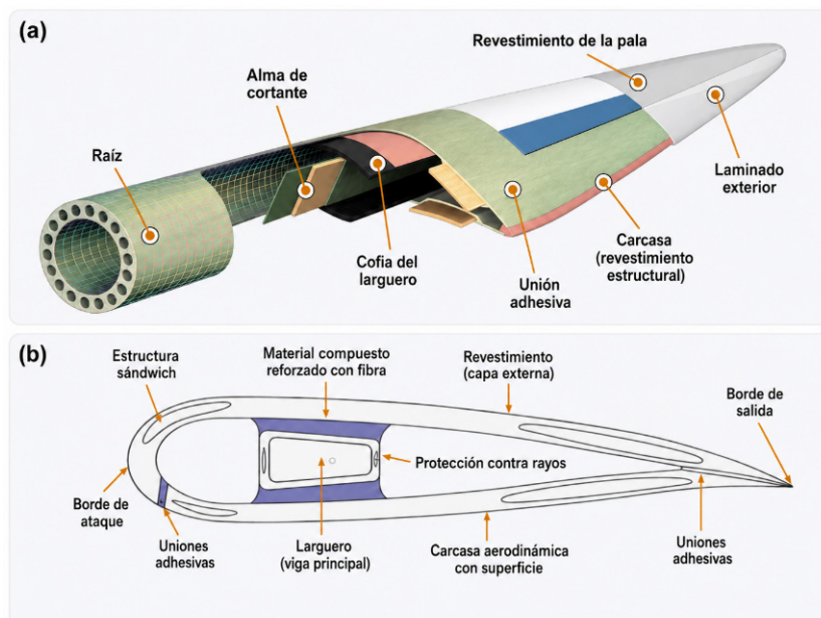


Figura 1. a) Estructura interna de una pala de aerogenerador. b) Corte transversal de los elementos internos de una pala de aerogenerador. Adaptado de Riley et al. [4].

Figure 1. a) Internal structure of a wind turbine blade. b) Cross-section of its main structural elements. Adapted from Riley et al. [4].

componentes de los aerogeneradores, fabricados principalmente con metales, las palas presentan una composición heterogénea (Figura 1) y una estructura diseñada para soportar durante años elevadas cargas mecánicas y condiciones ambientales exigentes [2,3].

En este contexto, las palas se fabrican mayoritariamente con materiales compuestos constituidos por fibras de vidrio o de carbono embebidas en matrices poliméricas termoestables, principalmente resinas epoxi, de poliéster insaturado o de viniléster. Además, pueden incorporar adhesivos estructurales, revestimientos que protegen frente a la radiación UV y la humedad, cargas minerales y materiales de núcleo, como madera de balsa o espumas poliméricas de PET o PVC. Esta combinación proporciona una elevada resistencia específica, rigidez y durabilidad, pero dificulta considerablemente su separación y reciclaje. En particular, las resinas termoestables forman durante el curado una red tridimensional altamente reticulada que, a diferencia de los materiales termoplásticos, no puede fundirse y remodelarse mediante calentamiento [3, 5, 6].

Entre las alternativas estudiadas se encuentran la reutilización de segmentos de pala, el reciclaje mecánico, el coprocesamiento en cementeras, la solvolisis y los tratamientos termoquímicos [3,5,6]. El reciclaje mecánico permite aprovechar

el material triturado como carga en nuevos productos, aunque generalmente reduce su valor. Los tratamientos químicos pueden recuperar fibras y compuestos derivados de la resina, pero suelen requerir disolventes específicos y condiciones de operación exigentes, además de etapas posteriores para recuperar y reutilizar esos disolventes, lo que puede dificultar su escalado industrial. La pirólisis, por su parte, descompone térmicamente la matriz polimérica en ausencia de oxígeno y genera tres corrientes principales: una fracción sólida, un líquido condensable y gases no condensables (Figura 2) [5-7].

La fracción sólida obtenida durante la pirólisis contiene principalmente las fibras de refuerzo, cargas minerales y una cantidad variable de residuo carbonoso. El gas está constituido por diferentes compuestos ligeros y puede contribuir parcialmente al suministro energético del propio proceso. La fracción líquida, comúnmente denominada aceite de pirólisis, constituye una mezcla compleja de hidrocarburos aromáticos, compuestos oxigenados y productos derivados de la degradación de la matriz polimérica. La composición y los rendimientos de estas corrientes dependen del tipo de resina y de fibra, de la temperatura, del tiempo de residencia, de la velocidad de calentamiento y de la configuración del reactor [7-9].



Figura 2. Productos obtenidos en la pirólisis de residuos de palas de aerogenerador y sus posibles rutas de valorización.

Figure 2. Products obtained from the pyrolysis of wind turbine blade waste and their potential recovery pathways.

En estudios de materiales compuestos basados en resinas de poliéster insaturado se ha observado que el aceite puede presentar un elevado contenido de compuestos aromáticos, entre los que se encuentran estireno, etilbenceno, tolueno, α -metilestireno y otros derivados del benceno. Así, López et al. [7] obtuvieron, mediante la termólisis de un composite de fibra de vidrio y poliéster, un aceite formado mayoritariamente por compuestos aromáticos, identificando el estireno entre sus principales productos. Más recientemente, Yousef et al. [8] estudiaron directamente la pirólisis de palas de aerogenerador fabricadas con fibra de vidrio y resina de poliéster insaturado, demostrando la posibilidad de recuperar simultáneamente

fibras de vidrio y un aceite rico en estireno. Otros estudios han confirmado que las condiciones de pirólisis y la atmósfera de operación afectan tanto a la distribución de los productos como a las características de las fibras recuperadas [9].

La presencia de estireno en el aceite abre la posibilidad de avanzar desde una valorización exclusivamente energética hacia la recuperación de productos químicos de mayor valor añadido. Sin embargo, el aceite de pirólisis es una mezcla compleja y no puede emplearse directamente como fuente de estireno, por lo que requiere operaciones posteriores de separación y acondicionamiento [8,10].

En estudios de materiales compuestos basados en resinas de poliéster insaturado se ha observado que el aceite puede presentar un elevado contenido de compuestos aromáticos, entre los que se encuentran estireno, etilbenceno, tolueno, α -metilestireno y otros derivados del benceno. Así, López et al. [7] obtuvieron, mediante la termólisis de un composite de fibra de vidrio y poliéster, un aceite formado mayoritariamente por compuestos aromáticos, identificando el estireno entre sus principales productos. Más recientemente, Yousef et al. [8] estudiaron directamente la pirólisis de palas de aerogenerador fabricadas con fibra de vidrio y resina de poliéster insaturado, demostrando la posibilidad de recuperar simultáneamente fibras de vidrio y un aceite rico en estireno. Otros estudios han confirmado que las condiciones de pirólisis y la atmósfera de operación afectan tanto a la distribución de los productos como a las características de las fibras recuperadas [9].

La presencia de estireno en el aceite abre la posibilidad de avanzar desde una valorización exclusivamente energética hacia la recuperación de productos químicos de mayor valor añadido. Sin embargo, el aceite de pirólisis es una mezcla compleja y no puede emplearse directamente como fuente de estireno, por lo que requiere operaciones posteriores de separación y acondicionamiento [8,10].

1.2. ¿Por qué interesa recuperar el estireno?

El interés por recuperar el estireno no se debe únicamente a su elevada presencia en el aceite de pirólisis. Se trata de una materia prima ampliamente empleada para fabricar poliestireno y poliestireno expandido (EPS), copolímeros de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) y estireno-acrilonitrilo (SAN), caucho estireno-butadieno y resinas de poliéster insaturado. Estos materiales están presentes en envases, aislamientos térmicos, componentes de automoción, electrodomésticos, equipos electrónicos, recubrimientos y productos de caucho (Figura 3) [11].

En el caso de las resinas de poliéster insaturado, el estireno cumple una doble función: reduce la viscosidad de la formulación y participa en la reacción de reticulación que transforma la resina líquida en un material sólido y resistente [12]. Por ello, la recuperación de una corriente rica en este compuesto resulta especialmente interesante dentro de una estrategia de valorización química. No obstante, antes de considerar su reutilización sería necesario aumentar su pureza, comprobar su estabilidad y evaluar su comportamiento en la aplicación de destino.

Para aprovechar este potencial, el aceite debe transformarse primero en una corriente de composición más sencilla y con una mayor concentración de estireno. La destilación fraccionada constituye una de las primeras operaciones que pueden emplearse con este objetivo.

1.3. La destilación: una herramienta para concentrar el estireno

La destilación constituye una de las principales opciones para fraccionar estos aceites, ya que permite separar parcialmente sus componentes de acuerdo con sus diferencias de volatilidad. Este proceso ha sido estudiado en aceites de pirólisis de poliestireno, cuya composición presenta determinadas similitudes con los aceites ricos en estireno procedentes de resinas de poliéster. Dahal et al. [10] combinaron experimentos y simulaciones para diseñar un proceso de destilación orientado a la recuperación de estireno a partir de aceite de pirólisis de poliestireno, mostrando que es posible retirar compuestos ligeros y concentrar el monómero en fracciones específicas. Sin embargo, la composición más heterogénea de los aceites procedentes de palas reales puede introducir dificultades adicionales relacionadas con la presencia de compuestos oxigenados, oligómeros, partículas y sustancias de elevado punto de ebullición.



Figura 3. Relación entre el etilbenceno, el estireno y algunas de sus principales aplicaciones industriales.

Figure 3. Relationship between ethylbenzene, styrene and some of their main industrial applications.

En comparación con los numerosos trabajos dedicados a la pirólisis y a la caracterización de los productos obtenidos, la literatura relacionada con el fraccionamiento posterior de aceites reales de palas de aerogenerador continúa siendo limitada. En particular, resulta necesario determinar en qué medida las condiciones de operación de la destilación, como la presión, el intervalo de recogida y la relación de reflujo, permiten aumentar la concentración de estireno y cómo afectan simultáneamente a su recuperación. Los antecedentes disponibles sugieren que la destilación puede actuar como una etapa inicial de preconcentración, aunque probablemente deba combinarse con otras operaciones para alcanzar una pureza elevada [8,10,13].

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo fue evaluar la destilación fraccionada como primera etapa para recuperar una corriente rica en estireno a partir del aceite de pirólisis de palas de aerogenerador. Para ello, el destilado se dividió en diferentes intervalos de recogida y se evaluaron distintas relaciones de reflujo, analizando tanto el enriquecimiento alcanzado como la cantidad de estireno recuperada. También se identificaron las principales limitaciones del proceso, especialmente las asociadas a la presencia de etilbenceno.

3. Actividades realizadas

3.1. De la pala al aceite de pirólisis

Se utilizó un aceite obtenido mediante la pirólisis de una placa previamente segregada de material compuesto procedente de una pala de aerogenerador, constituida principalmente por fibra de vidrio y una matriz de resina de poliéster. El tratamiento se realizó a 550 °C en un reactor de lecho fijo, en condiciones de ausencia de oxígeno. Los vapores generados durante la descomposición térmica de la matriz polimérica se enfriaron para recuperar la fracción líquida condensable, denominada aceite de pirólisis.

El aceite fue caracterizado mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID), utilizando calibración específica para una selección de compuestos aromáticos y oxigenados de interés. Se realizaron dos repeticiones, y la dispersión entre las dos inyecciones se representó mediante la desviación estándar. Como se muestra en la Figura 4, el estireno fue el compuesto mayoritario entre las especies cuantificadas, con una concentración del $22,34 \pm 0,58$ % en peso. También se detectaron cantidades relevantes de etilbenceno, tolueno y α -metilestireno, con concentraciones de $8,55 \pm 0,24$ %, $5,75 \pm 0,18$ % y $4,50 \pm 0,11$ % en peso, respectivamente. La elevada presencia de estireno motivó el estudio posterior de la destilación como una primera etapa para su concentración y recuperación.

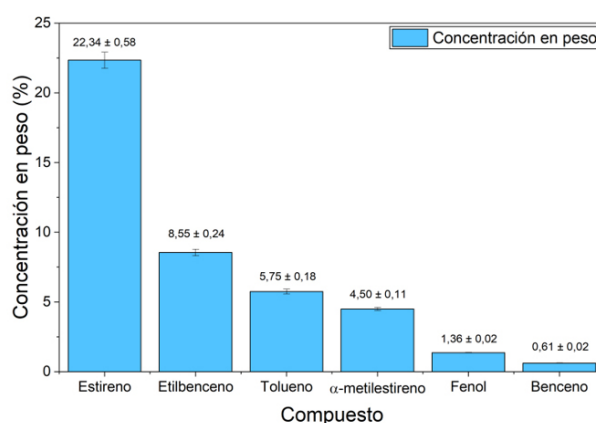


Figura 4. Concentración de los principales compuestos de interés cuantificados en el aceite de pirólisis. Las barras de error representan la desviación estándar (n=2).

Figure 4. Concentrations of the main compounds of interest quantified in the pyrolysis oil. The error bars represent the standard deviation (n=2)

3.2. ¿Cómo se concentró el estireno?

Una vez conocida la composición del aceite, el siguiente paso consistió en estudiar si era posible concentrar el estireno mediante destilación fraccionada. Para ello se utilizó un equipo automatizado Pilodist 104, provisto de una columna equivalente a 40 platos teóricos y operado a una presión de 133 mbar bajo atmósfera de nitrógeno (Figura 5).

El aceite de pirólisis se introduce en un calderín, donde se calienta para generar vapores que ascienden por la columna de destilación. A lo largo de la columna se producen sucesivos contactos entre el vapor ascendente y el líquido que desciende, favoreciendo la separación de los componentes según sus diferencias de volatilidad. Los compuestos más volátiles tienden a alcanzar antes la parte superior de la columna, mientras que los menos volátiles permanecen durante más tiempo en las zonas inferiores.

La capacidad de separación de la columna se expresa mediante el número de platos teóricos. Estos no corresponden necesariamente a platos físicos, sino que representan etapas ideales sucesivas de contacto entre las fases líquida y vapor. En este caso, la columna utilizada equivale a 40 platos teóricos, lo que permite realizar una separación más eficaz que una destilación simple.

Trabajar a vacío permite disminuir la temperatura necesaria para vaporizar los componentes del aceite. Además, la presión de operación influye en el equilibrio líquido-vapor y, por tanto, en el comportamiento de los diferentes compuestos durante la destilación. Por su parte, el uso de nitrógeno permite mantener una atmósfera inerte durante el proceso.

En la parte superior de la columna, los vapores se condensan. Una parte del líquido condensado se recoge como destilado, mientras que otra se devuelve a la columna como reflujo.

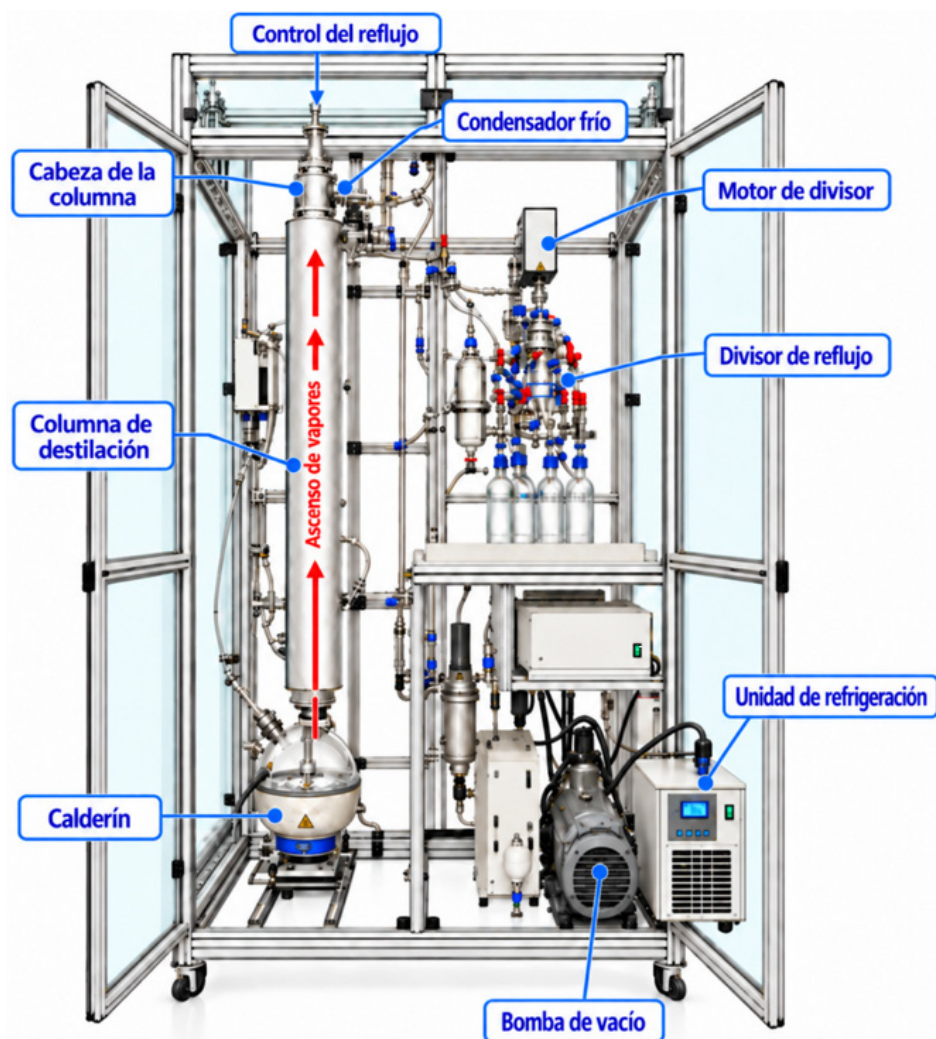


Figura 5. Representación del equipo de destilación Pilodist 104.

Figure 5. Diagram of the Pilodist 104 distillation unit.

Este retorno aumenta el contacto entre las fases líquida y vapor y favorece la separación de compuestos con volatilidades diferentes. La relación de reflujo indica la proporción de líquido condensado que retorna a la columna respecto a la que se retira como destilado. Así, una relación 6:1 implica que, por cada parte recogida como producto, aproximadamente seis partes retornan a la columna para continuar participando en el proceso de separación.

Se estudiaron varias condiciones de reflujo y se recogieron diferentes fracciones, que posteriormente fueron analizadas mediante cromatografía de gases. Se evaluaron relaciones de reflujo de 2:1, 4:1, 6:1, 8:1 y 10:1. En cada ensayo se registraron las temperaturas del calderín y de la cabeza de la columna, así como la masa recuperada en cada fracción y la masa del residuo final.

Con el fin de separar progresivamente los compuestos de acuerdo con su volatilidad, el destilado se dividió en diferentes intervalos de recogida. Se obtuvo una primera fracción correspondiente a los compuestos más volátiles, seguida de un corte intermedio orientado a la concentración del estireno y una tercera fracción que agrupó compuestos de menor volatilidad,

como el α -metilestireno y el fenol. Además, se recogieron separadamente los líquidos retenidos en el precondensador y el residuo remanente en el calderín al finalizar la operación.

Como la destilación se realizó a vacío, las temperaturas registradas durante el proceso son inferiores a las que corresponderían a la misma mezcla a presión atmosférica. Para facilitar la interpretación de los resultados y su comparación con los puntos de ebullición habituales de los compuestos, los límites de las fracciones se expresaron mediante temperaturas de ebullición equivalentes a presión atmosférica. Esta temperatura equivalente permite representar, a una presión de referencia de 1 atm, el comportamiento de ebullición observado durante la destilación a vacío.

En el ensayo de referencia, con una relación de reflujo 2:1, se establecieron tres cortes definidos mediante temperaturas de ebullición equivalentes a presión atmosférica: hasta 132 °C, entre 132 y 160 °C y entre 160 y 190 °C. Cada fracción fue pesada y analizada mediante GC-FID para determinar su concentración de benceno, tolueno, etilbenceno, estireno, fenol y α -metilestireno. Para el resto de relaciones de reflujo se mantuvieron los mismos intervalos de recogida.

4. Resultados obtenidos

Los resultados de la destilación permiten responder a tres preguntas fundamentales: ¿en qué fracción se concentró el estireno?, ¿qué efecto tuvo la relación de reflujo? y ¿por qué no fue posible obtener estireno de elevada pureza? Las respuestas muestran tanto el potencial de esta operación como las limitaciones que todavía deben superarse.

4.1. ¿Dónde se concentró el estireno?

La destilación permitió repartir los componentes del aceite de pirólisis en fracciones con composiciones claramente diferenciadas. Los compuestos más volátiles, principalmente el benceno y el tolueno, se concentraron en el primer corte. El estireno se acumuló preferentemente en la fracción intermedia, recogida entre 132 y 160 °C, mientras que compuestos de menor volatilidad, como el fenol y el α -metilestireno, aparecieron principalmente en el corte de mayor temperatura.

Esta distribución confirmó que la destilación podía simplificar una mezcla inicialmente compleja y dirigir buena parte del estireno hacia una sola corriente. En el ensayo realizado con una relación de reflujo de 6:1 se alimentaron 1000,35 g de aceite de pirólisis y se recuperaron 978,02 g entre las diferentes fracciones y el residuo final. Esto representa un cierre global de masa del 97,77 %, indicando que la mayor parte del material introducido en el equipo pudo ser contabilizada.

La fracción recogida entre 132 y 160 °C representó el 24,94 % de la masa inicial y alcanzó una concentración de estireno del 75,85 % en peso, frente al 22,34 % presente en el aceite original. En otras palabras, la destilación multiplicó por aproximadamente 3,4 la concentración de estireno.

Además del enriquecimiento, resulta importante considerar cuánto estireno fue realmente recuperado. Esta fracción intermedia reunió aproximadamente el 84,7 % del estireno inicialmente contenido en el aceite. Por tanto, no solo fue la corriente con mayor concentración, sino también la que capturó la mayor parte del compuesto disponible.

Este resultado muestra que una única operación de destilación fraccionada puede transformar el aceite de pirólisis en una corriente mucho más sencilla y rica en estireno. Sin embargo, aumentar la concentración de un compuesto no significa necesariamente obtenerlo con elevada pureza, como se analiza en los apartados siguientes.

4.2. ¿Más reflujo significa siempre una mejor separación?

En principio, aumentar la relación de reflujo puede favorecer la separación al incrementar el contacto entre las fases líquida y vapor. No obstante, devolver una mayor cantidad de líquido también prolonga la operación y puede aumentar el consumo energético, ya que una mayor proporción

del condensado retorna a la columna y debe volver a participar en los ciclos de vaporización y condensación. Además, puede modificar la distribución de los compuestos entre las diferentes fracciones.

La Figura 6 compara las concentraciones de estireno y etilbenceno obtenidas en la fracción de 132-160 °C para las relaciones de reflujo de 2:1, 4:1, 6:1, 8:1 y 10:1.

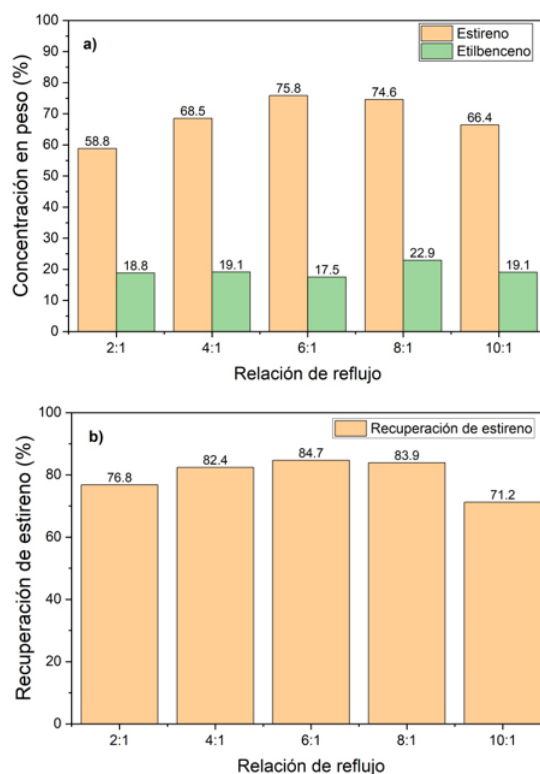


Figura 6. Efecto de la relación de reflujo sobre la concentración y recuperación de estireno: a) concentración de estireno y etilbenceno en la fracción enriquecida; b) recuperación de estireno en la fracción enriquecida.

Figure 6. Effect of reflux ratio on styrene concentration and recovery: a) styrene and ethylbenzene concentrations in the enriched fraction; b) styrene recovery in the enriched fraction.

Al aumentar la relación de reflujo desde 2:1 hasta 6:1, la concentración de estireno aumentó progresivamente desde el 58,8 hasta el 75,8 % en peso. La condición 6:1 proporcionó, por tanto, el mayor enriquecimiento entre los ensayos realizados.

Sin embargo, la tendencia no continuó al seguir aumentando el reflujo. Con una relación de 8:1, la concentración de estireno descendió ligeramente hasta el 74,6 %, mientras que con 10:1 disminuyó de forma más acusada hasta el 66,4 %.

Además de la concentración alcanzada, resulta importante considerar la recuperación de estireno, es decir, qué proporción del estireno inicialmente presente en el aceite termina en la fracción de 132-160 °C. Ambos parámetros son complementarios: una fracción puede presentar una elevada concentración de estireno, pero resultar menos interesante si solo recupera una pequeña parte del compuesto inicialmente disponible. La recuperación siguió una tendencia similar a la observada para la concentración de estireno: aumentó desde el

la concentración de estireno: aumentó desde el 76,8 % para una relación de reflujo de 2:1 hasta un máximo del 84,7 % para 6:1, se mantuvo próxima a este valor con 8:1 (83,9 %) y descendió hasta el 71,2 % con 10:1.

Estos resultados muestran que aumentar la relación de reflujo no implica necesariamente una mejor separación. Dentro de las condiciones estudiadas, la relación 6:1 proporcionó simultáneamente la mayor concentración de estireno y la mayor recuperación en la fracción enriquecida. El resultado final también puede depender del tiempo de operación, de la cantidad de material que retorna a la columna y de cómo se distribuyen los distintos compuestos entre las fracciones.

4.3. El etilbenceno: un compañero difícil de separar

Aunque la fracción obtenida con una relación de reflujo de 6:1 contenía principalmente estireno, todavía incluía una proporción importante de etilbenceno. Su composición fue del 75,8 % de estireno, 17,5 % de etilbenceno y 6,6 % de otros compuestos, calculados por diferencia hasta completar el 100 % (Figura 7).



Figura 7. Principales componentes de la fracción obtenida en la destilación en reflujo 6:1.

Figure 7. Main components of the fraction obtained from the 6:1 reflux distillation.

Por tanto, el producto obtenido no puede considerarse estireno purificado. El término más adecuado es fracción enriquecida en estireno, ya que la destilación aumentó notablemente su concentración, pero no consiguió separarlo completamente del resto de los componentes.

La principal dificultad se encuentra en la similitud de las propiedades físicas del estireno y el etilbenceno. A presión atmosférica, el etilbenceno hierve aproximadamente a 136 °C y el estireno alrededor de 145 °C [14]. Aunque el trabajo a vacío reduce las temperaturas necesarias para vaporizarlos, no elimina la similitud entre sus volatilidades. Como resultado, ambos compuestos

presentan comportamientos de destilación próximos, de modo que una parte importante del etilbenceno acompaña al estireno en el mismo corte.

La elevada eficacia de la columna y el empleo de reflujo mejoraron la separación, pero no fueron suficientes para aislar ambos compuestos mediante una única operación. Esto explica por qué el etilbenceno continuó representando el segundo componente mayoritario de la fracción enriquecida.

No obstante, el etilbenceno no debe considerarse únicamente una impureza sin valor. Industrialmente se utiliza como materia prima para la producción de estireno [13]. Por ello, una separación posterior más selectiva podría generar dos corrientes potencialmente aprovechables: una rica en estireno y otra enriquecida en etilbenceno. Antes de plantear su reutilización sería necesario comprobar su pureza, estabilidad y comportamiento en la aplicación de destino.

En conjunto, los resultados muestran que la destilación constituye una etapa eficaz de preconcentración. Permite recuperar en una sola fracción la mayor parte del estireno contenido en el aceite, pero debe combinarse con otra operación de separación cuando se requiera una corriente de mayor pureza.

5. Retos y perspectivas

El siguiente paso será evaluar operaciones complementarias que permitan aumentar la pureza de la fracción obtenida. Una de las alternativas es la destilación extractiva con sulfolano u otros disolventes selectivos, capaces de modificar el equilibrio vapor-líquido y favorecer la separación entre el estireno y el etilbenceno [13].

La elección de la estrategia más adecuada deberá considerar no solo la pureza final, sino también la recuperación de estireno, el consumo energético, la estabilidad del monómero y la posibilidad de aprovechar otras corrientes del proceso. Estas alternativas podrían convertir la fracción enriquecida obtenida mediante la destilación inicial en una alimentación más adecuada para posteriores etapas de purificación y valorización química.

6. Conclusiones

Las palas de aerogenerador constituyen un residuo especialmente complejo debido a la combinación de fibras, resinas termoestables y otros materiales difícilmente separables. Sin embargo, mediante procesos como la pirólisis, parte de esta complejidad puede transformarse en corrientes con potencial de aprovechamiento. Entre ellas, el aceite de pirólisis no debe considerarse únicamente como un posible combustible, ya que también contiene compuestos aromáticos de interés que pueden recuperarse mediante operaciones posteriores de separación.

En este trabajo, la destilación fraccionada permitió

augmentar la concentración de estireno desde el 22,3 % presente en el aceite inicial hasta un máximo del 75,8 % en peso. Además, una única fracción concentró cerca del 85 % del estireno inicialmente disponible, lo que demuestra que la destilación puede actuar como una etapa eficaz de preconcentración.

No obstante, la presencia de una cantidad relevante de etilbenceno pone de manifiesto que obtener estireno de elevada pureza continúa siendo un reto. Será necesario combinar la destilación con otras estrategias de separación y evaluar posteriormente la calidad y las posibles aplicaciones de la corriente obtenida. Estos avances representan un paso hacia una valorización de mayor valor añadido de las palas al final de su vida útil y contribuyen al desarrollo de soluciones más circulares para el sector eólico.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto CICLO, Cooperación e Investigación para la Circularidad en la Industria Eólica (PLEC2024-011215), financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Agencia Estatal de Investigación (MICIU/AEI/10.13039/501100011033) y por FEDER, UE. Los autores agradecen la colaboración del consorcio formado por empresas y organismos de investigación.

Bibliografía

- [1] J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert, Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, *Resources, Conservation and Recycling*. 127 (2017) 221-232.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- [2] P. Liu, C.Y. Barlow, Wind turbine blade waste in 2050, *Waste Management*. 62 (2017) 229-240.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.007>
- [3] J.P. Jensen, K. Skelton, Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 97 (2018) 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041>
- [4] D.-K. Riley, Y. Chen, C. Lu, I. Mohagheghian, H. Hassanin, P. Sareh, Morphing structural materials used in wind turbine blades, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 216 (2025) 115618.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115618>
- [5] G. Oliveux, L.O. Dandy, G.A. Leeke, Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties, *Progress in Materials Science*. 72 (2015) 61-99.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>
- [6] S.J. Pickering, Recycling technologies for thermoset composite materials-current status, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 37 (2006) 1206-1215.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.030>
- [7] F.A. López, M.I. Martín, F.J. Alguacil, J.M. Rincón, T.A. Centeno, M. Romero, Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass-ceramic material, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 93 (2012) 104-112.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.10.003>
- [8] S. Yousef, J. Eimontas, K. Zakarauskas, N. Striugas, Recovery of styrene-rich oil and glass fibres from fibres-reinforced unsaturated polyester resin end-of-life wind turbine blades using pyrolysis technology, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 173 (2023) 106100.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106100>
- [9] M. Xu, H. Ji, Y. Wu, J. Di, X. Meng, H. Jiang, Q. Lu, The pyrolysis of end-of-life wind turbine blades under different atmospheres and their effects on the recovered glass fibers, *Composites Part B: Engineering*. 251 (2023) 110493.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110493>
- [10] R. Dahal, P. Uusi-Kyyny, J.-P. Pokki, T. Ohra-aho, V. Alopaeus, Conceptual design of a distillation process for the separation of styrene monomer from polystyrene pyrolysis oil: Experiment and simulation, *Chemical Engineering Research and Design*. 195 (2023) 65-75.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.05.039>
- [11] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Styrene, Styrene-7,8-oxide, and Quinoline, *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. 121 (2019), International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.
- [12] E.M.S. Sanchez, C.A.C. Zavaglia, M.I. Felisberti, Unsaturated polyester resins: Influence of the styrene concentration on the miscibility and mechanical properties, *Polymer*. 41 (2000) 765-769.
[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00184-6)
- [13] M.T.G. Jongmans, E. Hermens, M. Raijmakers, J.I.W. Maassen, B. Schuur, A.B. de Haan, Conceptual process design of extractive distillation processes for ethylbenzene/styrene separation, *Chemical Engineering Research and Design*. 90 (2012) 2086-2100.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.05.019>
- [14] National Institute of Standards and Technology, NIST Chemistry WebBook, SRD 69: Ethylbenzene (CAS 100-41-4) and Styrene (CAS 100-42-5), thermochemical data, <https://webbook.nist.gov/chemistry/> (consultado el 31 de julio de 2026).

FLEXBY: how the carbon contained in biomass residues gives rise to the fuels and materials of the future through microwave pyrolysis

FLEXBY: Cómo del carbono contenido en los residuos de biomasa nacen los combustibles y materiales del futuro mediante pirólisis por microondas

B. Ruiz¹, L. Taboada-Ruiz^{1,2}, E. Ciurcina^{1,2}, N. Ferrera-Lorenzo³, Michael Hepworth⁴, P. Álvarez¹, M. Díaz-Somoano¹

¹ Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR), CSIC. C/ Francisco Pintado Fe 26, 33011, Oviedo, España.

² Programa de Doctorado en Ingeniería de los Recursos Naturales (DIRENA), Universidad de Oviedo, Campus Universitario de Mieres, 33600 Mieres, Asturias, Spain.

³ IDENER Chemistry Division, Torre Sevilla, Planta 11, C/ Gonzalo Jiménez de Quesada, 2 - 41092 Sevilla, España.

⁴ KNEIA S.L, C/Aribau 168(1:1), 08036 Barcelona, España.

begorb@incar.csic.es

Abstract:

Liquid transport fuels derived from biomass have been proposed as part of the solution to mitigate climate change. However, most current biofuels are produced from food crops, which has a negative impact on food production. FLEXBY aims to produce advanced biofuels using an innovative and cost-effective process that will reach a Technology Readiness Level (TRL) of 5. In FLEXBY, biofuels will be produced from biogenic waste derived from microalgae cultivated in domestic wastewater, as well as from sewage sludge originating from the food industry. This waste biomass will undergo microwave pyrolysis to yield three distinct fractions: bioliquid, gas and biochar. The liquid fraction will be converted into biofuels for aviation, diesel and marine use via a versatile and innovative hydrogen-free hydrodeoxygenation process. The gaseous fraction will be converted into biohydrogen via a combined process of steam reforming, water gas shift (WGS) reaction and preferential CO oxidation (PrOx). FLEXBY promotes the circular economy by recycling biomass waste and all by-products generated during the project.

Resumen

Los combustibles líquidos para el transporte derivados de la biomasa se han propuesto como parte de la solución para mitigar el cambio climático. Sin embargo, la mayoría de los biocombustibles actuales se producen a partir de cultivos alimentarios, lo que tiene un impacto negativo en la producción de alimentos. FLEXBY tiene como objetivo la producción de biocombustibles avanzados a través de un proceso innovador y rentable que alcanzará un Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) de 5. En FLEXBY, se producirán biocombustible utilizando residuos biogénicos derivados de microalgas cultivadas en aguas residuales domésticas, así como lodos de depuradora de industrias alimentarias. Esta biomasa residual se someterá a pirólisis por microondas para obtener tres fracciones distintas: biolíquido, gas y biocarbón. La fracción líquida se convertirá en

biocombustibles para aviación, diésel y uso marítimo mediante un proceso de hidródesoxigenación versátil e innovador sin hidrógeno. La fracción gaseosa se convertirá en biohidrógeno mediante un proceso combinado de reformado con vapor, reacción de desplazamiento del gas de agua (WGS) y oxidación preferencial de CO (PrOx). FLEXBY promueve la economía circular mediante el reciclaje de los residuos de biomasa y de todos los subproductos generados durante el proyecto.

Introducción

Es otoño en el Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR-CSIC). Sobre un césped aún verde, que resiste a unas temperaturas inusualmente elevadas para esta época del año en Asturias, las hojas comienzan a cubrir los jardines de la entrada al centro. Repartidos por las zonas verdes, aparecen pequeños montones de ramas y restos de poda que esperan su retirada tras las labores de mantenimiento del arbolado. Para la mayoría de quienes pasan junto a ellos, estos materiales son una consecuencia natural del cambio de estación. Para quienes investigamos la valorización de recursos carbonosos, ofrecen una perspectiva muy distinta.

Cada resto vegetal acumulado representa una alternativa natural para almacenar el carbono capturado previamente de la atmósfera mediante la fotosíntesis. Pero para ojos expertos representa también una materia prima renovable con potencial para transformarse en energía, combustibles sostenibles o materiales carbonosos avanzados. La cuestión es tan sencilla como trascendente: ¿qué podemos hacer con todo ese carbono?

En realidad, la idea de transformar biomasa en un material más rico en carbono es casi tan antigua como el ser humano e incluso no es difícil imaginar que haya nacido de forma casual en los primeros homínidos descubriendo el potencial del fuego. Más adelante, aun mucho antes del desarrollo de la química reciente, diversas culturas aprendieron a producir carbón vegetal calentando madera en

condiciones de déficit de oxígeno, en lo que podría definirse como una forma primitiva de pirólisis. El uso de carbón vegetal permitió además alcanzar temperaturas superiores a las alcanzadas con procesos de combustión directa de la madera. No es de extrañar que tenga un papel destacado en el desarrollo de la metalurgia y facilitó, la obtención de cobre, bronce e incluso hierro, contribuyendo al desarrollo de la humanidad durante milenios. Nació así una de las primeras formas de modificación deliberada de un material rico en carbono.

Con el paso de los siglos, ese conocimiento empírico de aquellos carboneros y metalúrgicos dio paso a un entendimiento científico de todos los procesos en ellos involucrados. Hoy en día, la pirólisis, es una herramienta de ingeniería sofisticada y evolucionada para conseguir algo bastante parecido a los objetivos de antaño: aprovechar de la forma más eficiente posible el carbono contenido en la biomasa.

Fundamentos de la pirólisis de biomasa

En términos científicos, la pirólisis consiste en la descomposición termoquímica de la fracción orgánica de un material mediante la aplicación de calor y en ausencia o déficit de oxígeno, lo que da lugar a procesos extraordinariamente complejos de ruptura, reorganización y condensación molecular que transforman profundamente la estructura original del material. Como resultado de estas transformaciones se generan tres corrientes principales: sólido, líquido y gas.

La fracción sólida, conocida generalmente como char, está constituida por un residuo rico en carbono que puede contener proporciones variables de

cenizas y otros componentes inorgánicos, en función de la naturaleza y composición de la materia prima utilizada. En el caso de la pirólisis de biomasa, este material puede denominarse biocarbón (biochar). La fracción líquida, obtenida mediante la condensación de los vapores generados durante el proceso, está compuesta por agua y una mezcla compleja de compuestos orgánicos condensables, cuya naturaleza y composición dependen del material procesado. Por su parte, la fracción gaseosa está formada por los compuestos no condensables, entre los que pueden encontrarse hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono, metano y otros hidrocarburos ligeros. La proporción relativa de cada una de estas fracciones, así como su composición, depende de numerosos parámetros operativos, entre ellos la temperatura final alcanzada, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia de los vapores en el reactor y, especialmente, las características de la materia prima utilizada.

Por ello, la pirólisis no debe entenderse únicamente como una tecnología de conversión energética, sino también como una herramienta capaz de dirigir la transformación del carbono hacia productos con propiedades específicas.

La búsqueda de nuevos métodos para optimizar estas transformaciones ha impulsado el desarrollo de tecnologías innovadoras de calentamiento. Entre ellas, la pirólisis asistida por microondas se ha consolidado como una de las alternativas más prometedoras, al ofrecer una forma radicalmente distinta de suministrar energía al sistema y abrir nuevas posibilidades para el control de los procesos de conversión.

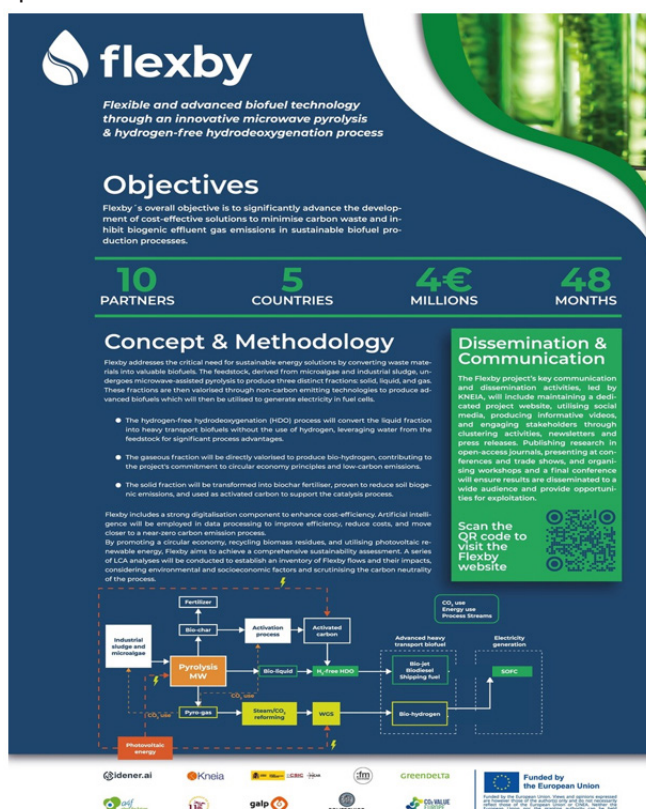


Figura 1. Cartel resumen del proyecto FLEXBY.

Figure 1. Summary poster of the FLEXBY project.

FLEXBY: una nueva generación de procesos de valorización

FLEXBY (*Flexible and Advanced Biofuel Technology through an Innovative Microwave Pyrolysis and Hydrogen-Free Hydrodeoxygenation Process*) es un proyecto de cuatro años iniciado en 2024 y financiado por el programa Horizonte Europa, con un presupuesto cercano a los cuatro millones de euros (figura 1).

El **Objetivo** es desarrollar y demostrar una plataforma tecnológica flexible para la producción de biocombustibles avanzados a partir de residuos orgánicos mediante la integración de pirólisis asistida por microondas, hidrodesoxigenación sin aporte externo de hidrógeno, valorización integral de coproductos y herramientas avanzadas de digitalización.

Uno de los **objetivos científicos** más ambiciosos del proyecto es impulsar la tecnología de pirólisis por microondas (figura 2) hacia niveles de madurez tecnológica más elevados, mediante el desarrollo de un demostrador capaz de procesar materias primas complejas, como biomasa microalgal y lodos industriales procedentes de empresas alimentarias, en condiciones representativas de operación. Entre los retos abordados se encuentran la comprensión de los mecanismos de interacción entre la radiación electromagnética y las materias primas, el control de los perfiles térmicos durante la reacción y la optimización de la distribución de productos obtenidos. Esta línea de investigación se desarrolla en el INCAR-CSIC, donde la doctora Begoña Ruiz Bobes, responsable del Grupo de Biocarbono, Circularidad y Sostenibilidad, lidera las actividades relacionadas con la pirólisis por microondas, su comparación con el calentamiento convencional y la validación de los materiales carbonosos obtenidos.

El proyecto **FLEXBY** está integrado por diez socios procedentes de países como España, Alemania, Italia, Portugal y Bélgica, cada uno de los cuales desempeña un papel específico en la cadena de desarrollo tecnológico: **IDENER** coordina el proyecto y trabaja en la modelización, optimización y demostración del proceso; **Fricke & Mallah** desarrolla la tecnología de pirólisis por microondas; **CSIC-INCAR** investiga y valida la pirólisis y caracteriza el biochar; la **Universidad de Sevilla** desarrolla los catalizadores y los procesos de producción de biocombustibles y biohidrógeno; **Politecnico di Milano** se encarga de la optimización y el escalado de las tecnologías; **A4F** trabaja en el cultivo y caracterización de microalgas; **Galp** evalúa la calidad y aplicabilidad de los biocombustibles obtenidos; **GreenDelta** analiza la sostenibilidad ambiental, económica y social; **KNEIA** lidera la comunicación, difusión y explotación de resultados; y **CO₂ Value Europe** facilita la colaboración y el clustering con otras iniciativas europeas. En conjunto, los socios aportan capacidades complementarias que permiten desarrollar, validar y evaluar la viabilidad de la tecnología FLEXBY desde la materia prima hasta la producción y aplicación del biocombustible.

La **principal innovación de FLEXBY** reside en su concepción como una biorrefinería integrada, donde cada una de las corrientes generadas durante la pirólisis se convierte en una fuente de productos de valor añadido, maximizando el aprovechamiento del carbono contenido en los residuos. La tecnología de pirólisis con el proyecto FLEXBY parte de una validación en laboratorio a una escala de integrador semi-piloto.

La **fracción líquida**, constituida por bioaceites ricos en compuestos oxigenados, se somete a una innovadora etapa de hidrodesoxigenación libre de hidrógeno externo. Este enfoque busca superar una



Figura 2. Representación genérica mediante IA de un sistema experimental de pirólisis asistida por MW.

Figure 2. AI-generated generic representation of an experimental MW-assisted pyrolysis system.

de las principales limitaciones de las tecnologías actuales de upgrading de bioaceites, reduciendo significativamente la dependencia de hidrógeno renovable y mejorando la viabilidad técnico-económica de la producción de combustibles avanzados para transporte pesado. La **fracción gaseosa**, formada por hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros gases ligeros, se valoriza para la producción de biohidrógeno y su posterior utilización en sistemas de generación eléctrica basados en pilas de combustible. Esta estrategia permite aumentar el rendimiento energético global del proceso y avanzar hacia esquemas de aprovechamiento prácticamente integral de la biomasa. La **fracción sólida**, reteniendo una parte significativa del carbono original de la materia prima, constituye una fuente especialmente interesante de biochar y materiales carbonosos avanzados. FLEXBY contempla su transformación en carbones activados y materiales funcionales con potencial aplicación en procesos de adsorción, catálisis, almacenamiento electroquímico de energía y tecnologías ambientales. Además, la estabilización del carbono biogénico en esta fracción abre nuevas oportunidades para la reducción de emisiones y el secuestro de carbono a largo plazo.

Finalmente, el proyecto incorpora herramientas de simulación avanzada, inteligencia artificial, gemelos digitales y análisis de ciclo de vida con el fin de optimizar el funcionamiento de la instalación, mejorar la eficiencia operativa y evaluar de forma integral los beneficios ambientales, energéticos y socioeconómicos de la tecnología desarrollada. La combinación de estos elementos sitúa a FLEXBY como un ejemplo representativo de las futuras biorrefinerías circulares basadas en la valorización integral del carbono contenido en los residuos.

Más allá del laboratorio: compartir conocimiento para un futuro más sostenible

La innovación científica alcanza todo su potencial cuando el conocimiento trasciende los límites del laboratorio e inspira nuevas ideas, colaboraciones y aplicaciones. Por ello, comunicar y difundir la investigación de FLEXBY constituye una parte esencial de la misión del proyecto. A través de actualizaciones sobre sus avances, vídeos, páginas web de los socios, cobertura mediática y publicaciones científicas, FLEXBY da a conocer su trabajo en materia de biocombustibles avanzados y valorización de residuos a investigadores, representantes de la industria, responsables políticos y al público en general. Los socios del proyecto han presentado sus resultados en congresos internacionales, compartido resultados técnicos mediante artículos científicos y pósteres, y contribuido a los debates sobre combustibles sostenibles y tecnologías circulares.

El proyecto también fomenta activamente las conexiones con iniciativas europeas complementarias mediante su participación en seminarios web conjuntos, simposios y actividades de colaboración entre proyectos (*clustering*), que promueven el intercambio de conocimientos y la cooperación. Estas

iniciativas contribuyen a dar visibilidad al potencial de la pirólisis por microondas y la valorización integrada de residuos, al tiempo que generan oportunidades para aprovechar los resultados de la investigación y favorecer su futura aplicación.

De este modo, el impacto de FLEXBY va más allá del desarrollo de nuevas tecnologías y contribuye a un debate más amplio sobre cómo la ciencia y la innovación pueden ayudar a construir un futuro más circular, sostenible y eficiente en el uso de los recursos.

El papel de INCAR-CSIC: ciencia y tecnología de la pirólisis

Dentro de FLEXBY, el papel del Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono es especialmente relevante. La participación del instituto se sustenta en una extensa trayectoria investigadora en el ámbito de la transformación termoquímica de materiales ricos en carbono, incluyendo carbones, biomásas y residuos orgánicos. Durante décadas, los grupos de investigación del INCAR-CSIC involucrados en el proyecto FLEXBY, el grupo de Biocarbono, Circularidad y Sostenibilidad y el grupo de Materiales Compuestos, han contribuido al conocimiento de procesos de pirólisis, gasificación, activación y valorización carbonosa, estudiando tanto los mecanismos de reacción como las propiedades de los materiales obtenidos. Esta experiencia proporciona una base científica sólida para afrontar los desafíos planteados por la conversión de corrientes residuales complejas mediante calentamiento por microondas.

Los primeros trabajos desarrollados en FLEXBY han permitido evaluar diferentes residuos y seleccionar aquellas corrientes con mejores perspectivas de valorización. Destacan las microalgas cultivadas en aguas residuales y determinados lodos industriales, caracterizados por su potencial energético y por su capacidad para interactuar eficazmente con el calentamiento por microondas.

La **Tabla 1** recoge algunos de los resultados de la caracterización química de las materias primas utilizadas en el proyecto FLEXBY, publicados previamente en el entregable D2.1, "Physicochemical Sheet for the Biomass Feedstock".

Esta línea de investigación se encuentra en plena expansión y se apoya en el amplio conocimiento adquirido en estudios de pirólisis convencional y flash, que han permitido analizar el comportamiento de distintos residuos en un amplio intervalo de temperaturas y condiciones de operación. Esta experiencia constituye una base científica de gran valor para abordar ahora su transformación mediante tecnologías asistidas por microondas. En este contexto, comunicaciones recientes del grupo han puesto de manifiesto el potencial de la pirólisis para valorizar microalgas cultivadas en aguas residuales, lodos industriales procedentes de la industria láctea y lodos de la industria del agar-agar, transformándolos en tres productos principales: biochar, bioaceite y gas.

Tabla 1. Análisis inmediato y elemental de las materias primas del proyecto FLEXBY.

Table 1. Proximate and ultimate analysis of the raw materials of the FLEXBY project.

Muestra de Biomasa	MV (%) ^a	Cenizas (%) ^a	C (%) ^a	H (%) ^a	N (%) ^a	S (%) ^a	O (%) ^{a, b}
Materia prima 1	62,7	24,43	40,56	5,80	5,79	0,35	23,07
Materia prima 2		22,26	41,73	6,19	4,10	0,25	25,47
Materia prima 3	36,19	60,22	18,78	2,36	3,58	1,06	14,00
Materia prima 4	51,25	41,07	28,58	3,72	5,47	1,00	20,16
Materia prima 5	72,29	22,56	44,20	6,18	5,50	0,55	21,01
Materia prima 6	79,80	13,35	54,31	8,45	5,88	0,38	17,63

^a Base seca

^b Calculado por diferencia

Esta línea de investigación se encuentra en plena expansión y se apoya en el amplio conocimiento adquirido en estudios de pirólisis convencional y flash, que han permitido analizar el comportamiento de distintos residuos en un amplio intervalo de temperaturas y condiciones de operación. Esta experiencia constituye una base científica de gran valor para abordar ahora su transformación mediante tecnologías asistidas por microondas. En este contexto, comunicaciones recientes del grupo han puesto de manifiesto el potencial de la pirólisis para valorizar microalgas cultivadas en aguas residuales, lodos industriales procedentes de la industria láctea y lodos de la industria del agar-agar, transformándolos en tres productos principales: biochar, bioaceite y gas.

Estas corrientes presentan interesantes posibilidades de aprovechamiento energético y ambiental, así como de obtención de materiales carbonosos de valor añadido. Estos estudios ponen de manifiesto la importancia de la composición de las materias primas y de las condiciones de procesado para optimizar las propiedades de los productos. La combinación del conocimiento acumulado y de estas nuevas vías de investigación abre oportunidades para convertir corrientes residuales en recursos de valor añadido, reduciendo al mismo tiempo su impacto ambiental.

La actividad científica que se está desarrollando ha dado lugar a diversas comunicaciones presentadas en congresos especializados, cuya relación se presenta a continuación:

- Maximising bio-oil yield from industrial dairy sludge: a paradigm on pyrolysis temperature and heating rate in the context of the EU FLEXBY project. *L. Taboada-Ruiz et al. (ORAL)*
- The potential of microalgae biomass from urban wastewater treatment for biofuel production by pyrolysis: flash versus conventional processes in the EU FLEXBY project. *R. Pardo et al. (ORAL)*
- Balancing quality and yield of biofuel and biochar in the pyrolysis of industrial macroalgae sludge: future perspectives with a circular economy approach in the EU FLEXBY project. *E. Ciurcina et al. (POSTER)*

- Equilibrio entre calidad y rendimiento de biocombustibles y biocarbón en la pirólisis de lodos industriales de macroalgas: perspectivas futuras desde una economía circular. *E. Ciurcina et al. (ORAL)*
- Maximización del rendimiento de bioaceite a partir de lodos de industrias Lácteas: un paradigma en la influencia de la temperatura de pirólisis y la velocidad de calentamiento. *L. Taboada-Ruiz et al. (ORAL)*
- Potencial del cultivo de microalgas en aguas residuales para la producción de biocombustibles mediante pirólisis: comparación entre procesos convencional y flash. *R. Pardo et al. (ORAL)*
- Heating Rate-Driven Control of Dairy Sludge Pyrolysis for Tailored Biofuel Production. *L. Taboada-Ruiz et al. (ORAL)*
- From Waste to Resource: Controlling Residence Time in Macroalgae Sludge Pyrolysis to Maximize Valorization. *E. Ciurcina, et al. (POSTER)*



Para una institución como el INCAR-CSIC, cuya actividad investigadora gira en torno al carbono y sus transformaciones. FLEXBY representa además una oportunidad para trasladar décadas de experiencia acumulada hacia uno de los ámbitos con mayor potencial de crecimiento dentro de la bioeconomía circular.

Conclusiones: Mirando al futuro

Hace miles de años, la pirólisis permitió a la humanidad fabricar el carbón vegetal que impulsó el desarrollo de la metalurgia y transformó las primeras civilizaciones. Hoy, en pleno siglo XXI, la misma idea fundamental sigue vigente, aunque con herramientas mucho más sofisticadas. Allí donde otros ven residuos, la investigación ve recursos; donde antes había un problema de gestión, hoy aparecen combustibles renovables, hidrógeno y materiales carbonosos avanzados.

Esa es, en esencia, la filosofía que inspira a FLEXBY: demostrar que el carbono contenido en los residuos no marca el final de una historia, sino el comienzo de una nueva. Una historia en la que la ciencia, la tecnología y la innovación permiten transformar aquello que desechamos, en parte de la solución a algunos de los grandes desafíos energéticos y ambientales de nuestro tiempo.

Y quizá todo comience, como en esta mañana de otoño frente al INCAR-CSIC, observando algo tan cotidiano como un montón de hojas y ramas acumuladas en un jardín. Porque en cada uno de esos restos vegetales sigue existiendo un recurso extraordinariamente valioso: el carbono. El mismo elemento que dio nombre a nuestro instituto y que continúa siendo protagonista de algunas de las soluciones más prometedoras para construir una sociedad más sostenible.

Referencias

FLEXBY- Flexible and advanced Biofuel technology through an innovative microwave pYrolysis & hydrogen-free hydrodeoxygenation process.

<https://cordis.europa.eu/project/id/101144144>

12th International Conference on Sustainable Solid Waste Management. (2025). Conference proceedings. Paphos, Cyprus, 25–28 June 2025.

<https://cyprus2025.uest.gr/proceedings/>

XVII Reunión del Grupo Español del Carbón (GEC 2025) — Zaragoza, 19-22 octubre 2025.

https://digital.csic.es/bitstream/10261/424456/1/MoS2_Carbon_Nanotube.pdf

4th International Conference on Green Energy and Environmental Technology (GEET-26) Abstract E-book: <https://zenodo.org/records/22309365>

B. Ruiz. D2.1 Physicochemical Sheet for the Biomass Feedstock, (2024).

Agradecimientos

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or CINEA. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them. The work described in this publication was subsidised by Horizon Europe (HORIZON) framework through the Grant Agreement Number 101144144.

Carbon Quantum Dots: Synthesis Using an Accessible Methodology

Puntos cuánticos de carbono: síntesis mediante metodología accesible

Javier Hernández Ferrer

Instituto de Carboquímica-CSIC

jhernandez@icb.csic.es

1. Introducción

Los puntos cuánticos son nanopartículas, normalmente con un tamaño entre 2 y 10 nm, en las que los electrones están cuánticamente confinados en las tres direcciones del espacio, con lo cual desaparece la estructura electrónica de bandas del material, apareciendo una estructura de niveles discretos que depende del tamaño, la forma y la relación de aspecto de la partícula, dando paso a una gran variedad de nuevas propiedades, totalmente distintas a las del material macroscópico.

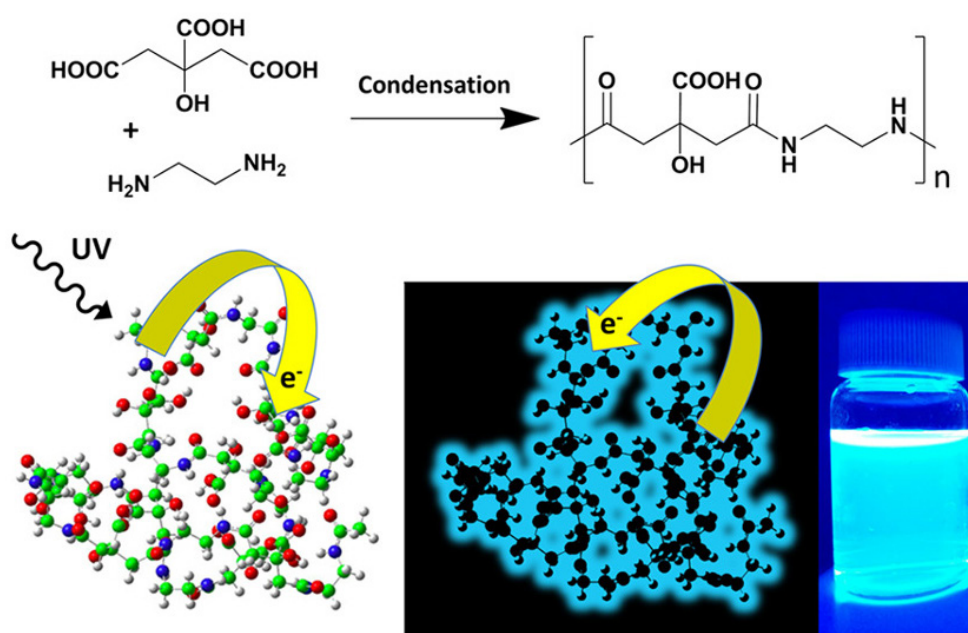
En este caso concreto, los puntos cuánticos de carbono constituyen una clase de nanomateriales con propiedades químicas, electrónicas y ópticas de notable interés, derivadas de su interacción con la radiación electromagnética. Estas características los hacen especialmente atractivos para diversas aplicaciones, como la conversión de energía solar [1] el desarrollo de sensores [2] y aplicaciones en biomedicina [3], entre las investigadas en el Grupo de Nanoestructuras de Carbono y Nanotecnología del Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC), además de otras descritas recientemente en la literatura, como la fabricación de LEDs [4].

Una de las estrategias de síntesis de puntos cuánticos de carbono consiste en la condensación

de compuestos ricos en grupos carboxílicos con compuestos que contienen grupos amino. Entre estos compuestos se encuentran biomoléculas como el ácido cítrico, con tres grupos carboxílicos, y los aminoácidos [5], especialmente la lisina, la cual presenta un grupo carboxílico y dos grupos amino. Este proceso de condensación conduce a la formación de redes de poliamida tridimensionales altamente reticuladas, caracterizadas por una elevada rigidez estructural y dimensiones nanométricas (**Esquema 1**). Estas propiedades estructurales, combinadas con su reducido tamaño, confieren a los materiales resultantes una intensa fluorescencia.

En el presente trabajo se describe un procedimiento de síntesis accesible de puntos cuánticos de carbono empleando precursores fácilmente disponibles, no tóxicos, y de origen biológico, como el ácido cítrico y el clorhidrato de L-lisina, mediante un proceso de caramelización térmica controlada en fase acuosa con bajo riesgo.

Advertencia de seguridad: Durante la reacción pueden generarse vapores ácidos. Es imprescindible trabajar en un entorno adecuadamente ventilado, preferiblemente con un sistema extractor en funcionamiento y empleando utensilios adecuados.



Esquema 1. Esquema de la condensación entre ácido cítrico y la etilendiamina descrita en L. Vallan et al. (reproducido con permiso de <https://doi.org/10.1021/jacs.8b06051>).

Scheme 1. Schematic representation of the condensation between citric acid and ethylenediamine described by L. Vallan et al. (reproduced with permission from <https://doi.org/10.1021/jacs.8b06051>).

2. Método experimental

2.1 Reactivos y materiales

Los reactivos y materiales necesarios para la síntesis se pueden observar en la **Figura 1**:

- Ácido cítrico (producto de limpieza común).
- Clorhidrato de L-lisina (suplemento nutricional).
- Agua del grifo.
- Recipiente resistente al calor. En este caso particular, un cazo esmaltado.
- Una cuchara.
- Sistema de calefacción con control de temperatura. En este caso particular, un sistema domestico de cocina por inducción.
- Sistema de ventilación adecuado. En este caso particular, un extractor de cocina.

Para la observación de la fluorescencia se emplea una linterna LED ultravioleta con longitud de onda de emisión de 365 nm y otra con una emisión de 395 nm. Las medidas de fluorescencia y rendimiento cuántico en laboratorio se realizaron en las instalaciones del Instituto de Carboquímica-CSIC utilizando un fluorímetro Horiba Jobin Yvon Fluoromax-P y un espectrofotómetro UV-visible Shimadzu UV-2401 PC.

2.2 Síntesis de puntos cuánticos de carbono

2.2.1 Preparación de la disolución precursora

Se mezcla una cucharada sopera de ácido cítrico y dos cucharadas soperas de clorhidrato de L-lisina (aproximadamente 1:2 en volumen). A continuación, se adicionan 50 mL agua y se agita con la cuchara sopera hasta lograr la completa disolución de los reactivos.

2.2.2 Tratamiento térmico

La disolución obtenida se somete a calentamiento hasta observar una ebullición suave. Durante este proceso, el agua se evapora progresivamente y se producen cambios en la viscosidad, la cual aumenta, y el color del sistema, que evoluciona hacia tonalidades amarillentas y posteriormente anaranjadas o marrones. Estos cambios indican la formación de estructuras carbonosas mediante procesos de condensación y/o carbonización.

Se puede monitorizar la aparición de estos fenómenos apuntando la linterna hacia el interior del cazo, observando una fluorescencia cada vez más intensa (**figura 2**).



Figura 1. Reactivos y materiales necesarios para síntesis de los puntos cuánticos de carbono.

Figure 1. Reagents and materials required for the synthesis of carbon quantum dots.

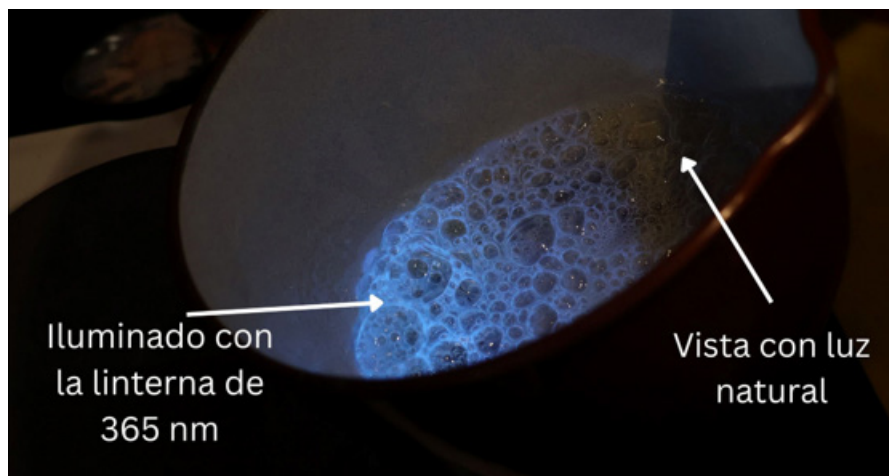


Figura 2. Aspecto del transcurso de la reacción. Vista del producto con luz natural (naranja-marrón) e iluminado con luz LED UV de 365 nm (fluorescente).

Figure 2. Appearance of the reaction as it proceeds. View of the product in natural light (orange-brown) and under 365 nm UV LED light (fluorescent).

3. Resultados y discusión

El material obtenido presenta una intensa fluorescencia azul cuando se irradia con luz ultravioleta de aproximadamente 365 nm (**Figura 3**). La intensidad de la emisión puede verse afectada por la concentración del sistema ("quenching"), siendo recomendable realizar diluciones para facilitar la observación y que el haz de luz ultravioleta penetre la totalidad del vial o recipiente de vidrio empleado.

Los espectros de fluorescencia (**Figura 4**) muestran un máximo de emisión en torno a 450 nm al excitar el material con radiación cercana a 360 nm, con un rendimiento cuántico aproximado del 9%. Estos resultados son coherentes con las observaciones experimentales y con la literatura previamente expuesta en este artículo.

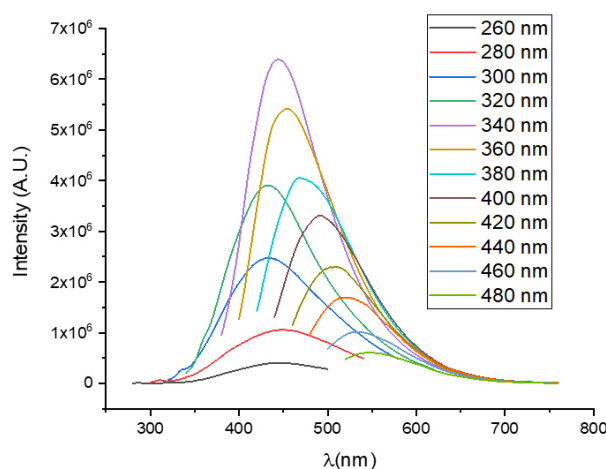


Figura 4. Espectros y mapa de fluorescencia de los puntos cuánticos de carbono obtenidos mediante este método.

Figure 4. Fluorescence spectra and fluorescence excitation-emission map of the carbon quantum dots obtained using this method.

Asimismo, se ha observado que la excitación con fuentes de mayor longitud de onda (por ejemplo, una linterna LED de 395 nm) produce una emisión menos intensa y desplazada hacia longitudes de onda mayores (región verde), lo que pone de manifiesto la dependencia de la emisión con la longitud de onda de excitación mostrada en los espectros (**Figura 5**).



Figura 5. Fluorescencia azul-verdosa observada al iluminar la suspensión con una linterna de 395 nm.

Figure 5. Blue-green fluorescence observed when the suspension was illuminated with a 395 nm LED lamp.



Figura 3. Fluorescencia azul observada al iluminar la suspensión con una linterna LED de 365 nm.

Figure 3. Blue fluorescence observed when the suspension was illuminated with a 365 nm LED lamp.

4. Conclusiones

Se ha descrito un procedimiento sencillo y de bajo riesgo relativo para la síntesis de puntos cuánticos de carbono fluorescentes empleando materiales accesibles y un equipamiento mínimo. El método permite obtener nanomateriales con propiedades ópticas características, en particular fluorescencia en la región visible del espectro.

Este tipo de aproximación experimental facilita la divulgación de conceptos fundamentales de química de materiales y nanociencia, así como la comprensión de fenómenos fotofísicos mediante observación directa.

Una demostración en clave humorística del método aquí expuesto se realizó en directo durante la noche europea de los investigadores celebrada en Zaragoza el 25 de septiembre de 2026 (<https://aragoninvestiga.es/wp-content/uploads/2026/09/Programa-Noche-europea-de-los-investigadores-e-investigadoras-2026.pdf>, **figura 6**), y un vídeo en ese mismo tono puede encontrarse en el siguiente enlace: <https://www.youtube.com/shorts/XNFcibqypxl>.



Figura 5. Imágenes de la Noche europea de los investigadores celebrada en Zaragoza el 25/09/2026.

Figure 5. Photographs from the European Researchers' Night held in Zaragoza on 25 September 2026.

Referencias

- [1] Ansón-Casaos A, Hernández-Ferrer J, Vallan L, Xie H, Lira-Cantú M, Benito AM, Maser WK. Functionalized carbon dots on TiO₂ for perovskite photovoltaics and stable photoanodes for water splitting. *Int J Hydrogen Energy* 2021; 46(22):12180-12191.
- [2] Vallan L, Urriolabeitia EP, Ruipérez F, Matxain JM, Canton-Vitoria R, Tagmatarchis N, Benito AM, Maser WK. Supramolecular-enhanced charge transfer within entangled polyamide chains as the origin of the universal blue fluorescence of polymer carbon dots. *J Am Chem Soc* 2018; 140(40):12862-12869.
- [3] Vallan L, Hernández-Ferrer J, Grasa L, González-Domínguez JM, Martínez MT, Ballesteros B, Urriolabeitia EP, Ansón-Casaos A, Benito AM, Maser WK. Differential properties and effects of fluorescent carbon nanoparticles towards intestinal theranostics. *Colloids Surf B Biointerfaces* 2020; 185:110612.
- [4] Shi Y, Su W, Yuan F, Yuan T, Song X, Han Y, Wei S, Zhang Y, Li Y, Li X, Fan L. Carbon dots for electroluminescent light-emitting diodes: Recent progress and future prospects. *Adv Mater* 2023; 35(44):2210699.
- [5] Kolanowska A, Dzido G, Krzywiecki M, Tomczyk MM, Łukowiec D, Rucza S, Boncel S. Carbon quantum dots from amino acids revisited: Survey of renewable precursors toward high quantum-yield blue and green fluorescence. *ACS Omega* 2022; 7(45):41165-41176.

5th International Summer School on Carbon and Related Nanomaterials: From Space to Earth and Back Again

5ª Escuela Internacional de Verano sobre Carbono y Nanomateriales Relacionados: del espacio a la Tierra y de vuelta al espacio

Organizadores:

Raúl Arenal (INMA, CSIC-Universidad de Zaragoza)

Wolfgang Maser (ICB-CSIC)



Coordinadores, docentes y alumnos de la escuela, junto con la directora de los Cursos Extraordinarios de Verano Unizar en frente del Palacio de Congresos de Jaca.

Del 13 al 17 de julio de 2026 tuvo lugar en Jaca (Huesca), en el marco de los Cursos Extraordinarios de la Universidad de Zaragoza, la **quinta International Summer School on “Carbon and related nanomaterials: Synthesis, characterization, properties and applications in energy”**, dirigida por Raúl Arenal (INMA, CSIC-Universidad de Zaragoza) y Wolfgang Maser (Instituto de Carboquímica, ICB-CSIC)^[1].

Cinco ediciones después, el **C60**, aquella esfera de carbono cuyo descubrimiento estuvo ligado al estudio de especies carbonosas en el espacio, sigue siendo un excelente punto de partida para recorrer un campo que no ha dejado de crecer: de los fullerenos a los **nanotubos de carbono, grafeno, graphene quantum dots, hacia otras nanoestructuras relacionadas**. Siguiendo este hilo, la Escuela ofreció un recorrido desde la comprensión de estas nanoestructuras hasta su modificación, procesamiento y combinación con otros materiales, para finalmente explorar sus aplicaciones.

Las **25 horas de clases, impartidas por 11 docentes** de España, Francia y Reino Unido, abordaron primero la síntesis, funcionalización y procesamiento de los diferentes nanomateriales (W.

Maser, R. Arenal, J.M. González, A. Benito, B. Zornoza y A. Dalton). Un segundo bloque se centró en cómo **caracterizar y comprender** estos sistemas mediante microscopía electrónica de transmisión (R. Arenal), espectroscopía Raman (M. Paillet), microscopía de fuerzas atómicas (J. Colchero) y métodos teóricos (A. Molina).

El recorrido continuó hacia las **aplicaciones**, especialmente en energía, incluyendo baterías, supercondensadores, hidrógeno (A. Ansón) y fotovoltaica (A. Urbina), pero también electrónica y sensores (A. Ansón, A. Dalton), así como separación de contaminantes y tratamiento de agua mediante membranas (B. Zornoza). Las posibilidades de estos materiales alcanzan incluso aplicaciones de gestión térmica en satélites, cerrando de alguna manera el círculo iniciado con el C60: **del espacio a las nanoestructuras de carbono estudiadas en la Tierra y, finalmente, de vuelta al espacio**.

Una **mesa redonda** permitió ampliar la discusión hacia algunos de los retos actuales del campo: cómo seleccionar el nanomaterial de carbono más adecuado para cada aplicación, la importancia de la **metrología y reproducibilidad** de las medidas y las dificultades asociadas a su implementación industrial.

Se debatieron asimismo nuevas oportunidades, entre ellas el potencial de la **inteligencia artificial** como herramienta para relacionar materiales, propiedades y aplicaciones.

En esta quinta edición participaron **15 alumnos procedentes de España, Australia, India, Italia, y Méjico** con perfiles que abarcaron desde estudiantes de segundo curso de grado hasta estudiantes de doctorado e investigadores postdoctorales, y con formación en física, química, materiales e ingeniería, entre otras disciplinas. Esta diversidad favoreció una elevada interacción entre alumnado y profesorado y reforzó el carácter inter- y multidisciplinar de la Escuela.

Gracias al patrocinio de la **Real Sociedad Española de Química (RSEQ)** y de su **Grupo Especializado de Nanociencia y Materiales Moleculares (GENAM)**, **Fundación ARAID** y **INMA-Unizar (programa Severo Ochoa)** fue posible ofrecer becas de inscripción para estudiantes y jóvenes investigadores. Como en ediciones anteriores, el ambiente singular de Jaca favoreció además las interacciones científicas y personales más allá de las propias clases. Cabe destacar asimismo el apoyo recibido por parte del equipo de los Cursos Extraordinarios de la Universidad de Zaragoza durante toda la Escuela.

Referencias

^[1] Página web: <https://cursosextraordinarios.unizar.es/curso/5th-ISS-carbon-and-related-nanomaterials>

Curso:**El Carbono y sus Materiales, Caracterización y Aplicaciones**

Se acercan las fechas de celebración de la tercera edición del curso de formación titulado *El Carbono y sus Materiales, Caracterización y Aplicaciones*, que organizamos desde nuestra asociación. En esta ocasión se celebrará entre el 23 y el 25 de noviembre de 2026, nuevamente en las instalaciones de la Sede Antonio Machado de la Universidad Internacional de Andalucía (UNIA), en la ciudad de Baeza. Además de la monumentalidad de la ciudad donde se aloja, la sede cuenta con una residencia anexa a disposición de los estudiantes y profesores que participen en el curso.

El horario del curso es de 9:00 a 14:00h y de 16:00 a 19:00h el lunes 23 y martes 24, y de 9:00 a 14:00h el miércoles 25 de noviembre. Los ponentes tratarán las siguientes temáticas:

Lunes, 23 de noviembre:

- Materiales clave para la transición energética: innovación, eficiencia y escalabilidad. Ana Arenillas de la Puente – INCAR, CSIC.
- El papel de la captura de CO₂ en la transición energética y la descarbonización. José Ramón Fernández García - INCAR, CSIC.
- Preparación de materiales de carbono. Noelia Alonso Morales - UAM.
- Caracterización de la textura porosa de los materiales de carbono. Agustín F. Pérez Cadenas – UGR.

Martes, 24 de noviembre:

- Caracterización de la Química Superficial de Materiales de Carbono - Francisco Carrasco Marín – UGR.
- Materias primas secundarias basadas en carbono: obtención, caracterización y aplicaciones industriales. Juan Daniel Martínez. – ICB, CSIC.
- Del carbono a la energía limpia: el papel de la electrocatálisis. Sara Pérez Rodríguez – ICB, CSIC.
- Aplicaciones catalíticas de los materiales de carbono. Juana M^a Rosas – UMA.

Miércoles, 25 de noviembre:

- Caracterización superficial de materiales de carbono mediante métodos electroquímicos y aplicaciones en sensores. Emilia Morallón – UA.
- Aplicaciones de los materiales de carbono en almacenamiento de energía. Diego Cazorla Amorós – UA.
- Mesa redonda: Ramiro Ruiz Rosas – UMA y Agustín F. Pérez Cadenas – UGR.

Para inscribirse en el curso ya se puede acceder al procedimiento on-line de auto matrícula de la UNIA (*). El plazo de matrícula finalizará el 19 de noviembre de 2026.

El coste del curso (expediente y matriculación) es de 158€. El coste de la residencia de la UNIA asciende a 25 €/noche en uso compartido. El Grupo Español del Carbón costeará la residencia a sus socios, pero estos deben igualmente indicar si van a hacer uso de la misma durante el proceso de matrícula y reservar su plaza.

IMPORTANTE: (*) Los socios del GEC tienen que realizar el proceso de matrícula individualmente a través de la web de la UNIA, pero deben consultar previamente, con sus respectivos centros o grupos de investigación, si proceden o no al pago individual de su matrícula. En este sentido, las Instituciones, Grupos o Centros de Investigación que tengan la intención de hacerse cargo de la inscripción de sus socios del GEC, podrán hacerlo mediante la emisión de una transferencia única por el importe total correspondiente a sus miembros; para acogerse a esta modalidad deben ponerse en contacto previamente con los directores del curso, ya que la UNIA solo acepta como norma general el pago de matrícula individual y mediante tarjeta.

Por tanto, los socios del GEC deben abstenerse de realizar su pago de matrícula, individualmente, hasta haberlo acordado con sus supervisores, y en caso de que sea su centro el que va a realizar el pago, no deben realizar la matrícula hasta que su centro comunique a la dirección del curso los nombres de todos los participantes, cuya matrícula, se va a incluir en un pago único mediante transferencia bancaria. El GEC no gestionará ni intercederá ante la UNIA para el reembolso de ningún pago de matrícula individual.

Como en ediciones anteriores organizamos este curso con muchas ganas e ilusión, y deseamos que sea de interés para el público en general, y nuestros socios en particular. A continuación de este curso, la misma tarde del día 25 de noviembre, comenzarán las terceras Jornadas de Jóvenes Investigadores del GEC.



Sede Antonio Machado de la Universidad Internacional de Andalucía (UNIA) (Baeza - Jaén)

III Jornadas de Jóvenes Investigadores del Grupo Español del Carbón

El Grupo Español del Carbón (GEC) organiza las **III Jornadas de Jóvenes Investigadores** que se celebrarán en la sede Antonio Machado de la UNIA (Baeza, Jaén) del **25 al 27 de noviembre de 2026**. Creemos en la importancia de impulsar la capacidad innovadora, el pensamiento creativo y la investigación de calidad en las nuevas generaciones de investigadores. Por ello, hemos creado este espacio de encuentro en un entorno singular, concebido para inspirar, compartir experiencias y fomentar la colaboración.



Las jornadas girarán en torno a la presentación de los trabajos de los participantes en formato oral y póster, organizados en torno a topics por sesiones.

Desde la organización os animamos a inscribiros y enviar vuestras contribuciones antes del 20 de octubre a la dirección: ***jovenesgec2026@gmail.com*** indicando el topic que seleccionéis:

- Materiales de carbono: nanomateriales, materiales compuestos y materiales avanzados (1D,2D,3D).
- Aplicaciones catalíticas, medioambientales y en salud.
- Aplicaciones en almacenamiento de energía.
- Tecnologías de generación sostenible de energía.

Los costes de inscripción incluyen dos comidas, y son los siguientes:

- Socios del GEC: 50 €
- No Socios del GEC: 110 €

Alojamiento (no incluido en la inscripción): Baeza tiene una amplia oferta hotelera. No obstante, la Sede Antonio Machado de la UNIA cuenta con servicio de Residencia Universitaria.

Servicio de Residencia: aquellas personas que deseen hacer uso de la misma deberán solicitarlo con antelación suficiente en la siguiente dirección de correo electrónico residencia.baeza@unia.es indicando si se es, o no, socio del GEC.

El importe del alojamiento es de 25 euros/noche en habitación compartida (noches del miércoles 25 y jueves 26), y correrá a cargo del GEC en el caso de sus socios (*).

Los NO-socios del GEC que quieran hacer uso de la residencia deben de abonar este importe junto con el de la inscripción a las jornadas directamente al GEC, y hacer ellos mismos la correspondiente reserva.

(*) Los socios del GEC que vayan a hacer uso de la residencia, tanto para este evento como para el Curso del GEC previo, deben de indicarlo en el email inicial que escriban al servicio de residencia con objeto de optimizar la gestión del servicio, así como la ocupación de habitaciones.

Podréis encontrar más información sobre las Jornadas, inscripción y formato de resúmenes en la web del GEC y en nuestras redes sociales en LinkedIn, X e Instagram.



<https://www.gecarbon.org>



https://www.linkedin.com/in/iii-jornadas-j%C3%B3venes-investigadores-gec-533a88413?utm_source=share_via&utm_content=profile&utm_medium=member_jos



https://x.com/III_JJI_GEC_26



<https://www.instagram.com/jornadasgec26?igsh=MWN2YmhzdnpZGI1OQ==>

En memoria del profesor Vicente Gómez Serrano: una vida dedicada a la ciencia, la universidad y su familia

María F. Alexandre Franco
Universidad de Extremadura

El pasado 18 de mayo de 2026 falleció el profesor Vicente Gómez Serrano, catedrático jubilado de Química Inorgánica de la Universidad de Extremadura y miembro destacado de la comunidad científica española dedicada al estudio de los materiales carbonosos. Su desaparición supone una pérdida profundamente sentida por quienes compartieron con él una dilatada trayectoria académica e investigadora, pero también por las numerosas personas que tuvieron la oportunidad de conocerlo y apreciar sus cualidades humanas. A lo largo de más de cuatro décadas de dedicación universitaria, Vicente desarrolló una intensa actividad docente e investigadora, contribuyendo significativamente al conocimiento de los materiales de carbono, especialmente en los ámbitos de su preparación, caracterización y aplicaciones medioambientales.

Su carrera profesional estuvo estrechamente vinculada a la Universidad de Extremadura, institución en la que desarrolló la mayor parte de su actividad académica. En 1987 fue nombrado profesor titular de Universidad del área de Química Inorgánica y, en 2002, alcanzó la categoría de catedrático. También asumió responsabilidades de gestión universitaria, entre ellas la dirección del Departamento de Química Inorgánica. Su compromiso con la institución se manifestó tanto en el desempeño de estas funciones como en su constante dedicación a la enseñanza, la investigación y la formación de nuevas generaciones de científicos. Su profunda vocación universitaria se prolongó incluso después de alcanzar la edad de jubilación, durante su etapa como profesor emérito, entre 2021 y 2023, periodo en el que continuó cultivando su pasión por la docencia y la investigación. Esta continuidad constituye una muestra especialmente elocuente de su manera de entender la profesión académica, no simplemente como una ocupación laboral, sino como una verdadera vocación intelectual y personal.

La incorporación de Vicente al campo de los materiales carbonosos estuvo ligada al desarrollo de esta línea de investigación en la Universidad de Extremadura durante la década de 1980. En un editorial publicado en 2016 en el Boletín del Grupo Español del Carbón, él mismo recordaba los primeros pasos de estas investigaciones, impulsadas inicialmente por los profesores Ángel Linares Solano y Concepción Martínez de Lecea. La instalación de los primeros equipos de adsorción física de gases en el Departamento de Química Inorgánica abrió nuevas posibilidades para el estudio de los sólidos porosos y sentó las bases de una actividad científica que adquiriría una creciente importancia en las décadas posteriores.

En ese contexto, Vicente desempeñó un papel fundamental en el desarrollo y la consolidación del

grupo de investigación Adsorbentes Carbonosos. Adsorción (ACA). Bajo su impulso, el grupo fue construyendo una trayectoria científica reconocible, basada en el estudio sistemático de la preparación de materiales carbonosos, sus propiedades fisicoquímicas y sus posibilidades de aplicación. Su actividad contribuyó asimismo a establecer colaboraciones con otros investigadores y grupos, tanto dentro como fuera de la Universidad de Extremadura, favoreciendo la expansión de las investigaciones sobre materiales de carbono hacia diferentes ámbitos científicos y tecnológicos.

Una de sus contribuciones más características fue el aprovechamiento de materiales residuales como precursores de adsorbentes carbonosos. Mucho antes de que conceptos como economía circular, valorización de residuos o sostenibilidad adquirieran la presencia actual en las políticas científicas y medioambientales, Vicente ya participaba activamente en investigaciones orientadas a transformar subproductos agrícolas, forestales e industriales en materiales de elevado valor añadido. Residuos lignocelulósicos, huesos de cereza, maderas, neumáticos fuera de uso y residuos plásticos constituyeron algunas de las materias primas estudiadas. Estos trabajos permitieron demostrar que materiales inicialmente considerados desechos podían convertirse, mediante tratamientos adecuados, en adsorbentes con propiedades específicas y aplicaciones de notable interés.

Desde el punto de vista científico, sus investigaciones prestaron especial atención a las relaciones entre las condiciones de preparación, la textura porosa, la composición química superficial y el comportamiento de los materiales obtenidos. El estudio de los procesos de carbonización y activación física y química, junto con la utilización de técnicas como la adsorción de gases, la porosimetría de mercurio, el análisis térmico y la espectroscopía infrarroja, constituyó una parte esencial de su trabajo. Su aproximación a estos problemas reflejaba una convicción científica constante: comprender adecuadamente un material exige relacionar sus propiedades estructurales y superficiales con los procesos que determinan su comportamiento.

Las aplicaciones medioambientales ocuparon también un lugar central en su trayectoria. Numerosos trabajos abordaron la utilización de carbones activados para la eliminación de contaminantes presentes en disoluciones acuosas, incluyendo especies metálicas y diversos compuestos orgánicos. En este contexto, sus investigaciones contribuyeron al conocimiento de los mecanismos de adsorción y de la influencia de las características superficiales de los adsorbentes sobre su eficacia y selectividad. Especial relevancia tuvo el estudio de la modificación química de los

carbones activados para mejorar su comportamiento frente a contaminantes específicos. Esta línea quedó reflejada, entre otras publicaciones, en el artículo de revisión *Activated carbon modifications to enhance its water treatment applications. An overview*, publicado en 2011 en *Journal of Hazardous Materials*, junto con investigadores de distintas instituciones.

La valorización de residuos poliméricos constituye otro ejemplo representativo de su capacidad para abordar problemas medioambientales desde la ciencia de materiales. Entre los estudios desarrollados destacan la preparación de carbones activados a partir de residuos de tereftalato de polietileno (PET) y su aplicación a la eliminación de contaminantes del agua, así como las investigaciones sobre adsorbentes obtenidos a partir de neumáticos usados y mezclas de residuos plásticos y elastoméricos. Estos trabajos integraban dos objetivos complementarios: ofrecer alternativas de aprovechamiento para residuos de difícil gestión y desarrollar materiales funcionales capaces de contribuir a la descontaminación de medios acuosos.

Su interés científico no se limitó, sin embargo, a la preparación de adsorbentes convencionales. A lo largo de los años participó en investigaciones sobre la química superficial de los materiales de carbono, los procesos de oxidación y modificación funcional, la preparación de materiales híbridos de carbón activado y óxidos metálicos, y sus aplicaciones catalíticas y fotocatalíticas. Esta diversificación permitió incorporar nuevas perspectivas al estudio de los materiales carbonosos, combinando conocimientos de química inorgánica, química de superficies, adsorción y ciencia de materiales.

En etapas más recientes, su actividad investigadora se extendió también hacia nuevas aplicaciones relacionadas con la energía y la valorización de residuos agroindustriales. Entre ellas destacan las investigaciones sobre carbones derivados de biomasa para su utilización en baterías de ion-litio, así como trabajos sobre adsorbentes obtenidos a partir de sarmientos y su potencial aplicación en la industria enológica. Su permanente interés por las posibilidades de los materiales carbonosos se reflejó igualmente en publicaciones sobre la química superficial de carbones activados preparados a partir de huesos de cereza. Todavía en enero de 2026 apareció un trabajo con su participación dedicado a la preparación de carbones activados a partir de cáscara de coco y su utilización en la eliminación de colorantes del agua, testimonio de una actividad científica mantenida hasta fechas muy recientes.

El reconocimiento a su trayectoria quedó expresado de manera particularmente significativa en la dedicación de un número especial de la revista *Processes* en su honor, bajo el título *A Themed Issue in Honor of Professor Vicente Gómez Serrano: Innovation in Production, Characterization and Applications of Activated Carbon, Biochar and Other Carbon-Based Materials*. Este reconocimiento puso de manifiesto la amplitud de los campos científicos relacionados con sus investigaciones y la consideración que su trabajo

había alcanzado entre especialistas en materiales carbonosos.

No obstante, el legado de Vicente no puede valorarse únicamente a través de sus publicaciones científicas. Una parte esencial de su contribución a la universidad fue su labor formativa. Durante su carrera participó en la dirección de numerosas tesis doctorales y en la orientación científica de investigadores que posteriormente desarrollaron sus propias trayectorias profesionales. Entre los ámbitos abordados por estos trabajos doctorales figuran la preparación de adsorbentes a partir de biomasa y residuos industriales, el estudio de materiales híbridos de carbón y óxidos metálicos y las aplicaciones medioambientales de los sólidos porosos. Su magisterio contribuyó a consolidar una escuela investigadora caracterizada por el rigor experimental, el conocimiento profundo de los materiales y la búsqueda de aplicaciones útiles para la sociedad.

En la formación de sus colaboradores, Vicente otorgaba gran importancia a la solidez de los resultados, a la interpretación cuidadosa de los datos y a la necesidad de comprender los fundamentos fisicoquímicos de los fenómenos estudiados. Su forma de trabajar transmitía una concepción de la investigación basada en la constancia, el esfuerzo y el análisis crítico. Esta manera de entender la ciencia, alejada de los protagonismos innecesarios, constituye una de las enseñanzas más valiosas que deja a quienes compartieron con él la actividad cotidiana del laboratorio y la universidad.

Su vinculación con el Grupo Español del Carbón merece una mención especial. Vicente participó activamente en las actividades de esta comunidad científica y asumió la presidencia del Comité Organizador de la XI Reunión del GEC, celebrada en Badajoz del 23 al 26 de octubre de 2011. Aquel encuentro constituyó una oportunidad para reunir a investigadores de diferentes instituciones, favorecer el intercambio científico y reforzar las relaciones personales que tradicionalmente han caracterizado al Grupo. También participó en las actividades de formación de jóvenes investigadores organizadas con motivo del vigésimo quinto aniversario del GEC, en 2016, y fue editor invitado del número 42 de su Boletín, dedicado en buena medida a las investigaciones sobre materiales carbonosos desarrolladas en la Universidad de Extremadura.

Pero cualquier semblanza de Vicente resultaría necesariamente incompleta si se limitara a su actividad académica. Quienes tuvimos la oportunidad de trabajar con él recordaremos, además de sus conocimientos científicos, su trato cercano, su serenidad y su calidad humana. Supo combinar la exigencia y el rigor profesional con el respeto hacia los demás, manteniendo una actitud de colaboración que facilitaba el trabajo compartido. Su dedicación a la universidad y a la investigación estuvo acompañada de una manera de relacionarse con las personas que hizo de él un compañero apreciado y un referente para muchos de quienes lo conocieron.

Y si su compromiso con la universidad fue extraordinario, no lo fue menos su entrega a la familia, que ocupó siempre un lugar esencial en su vida. Vicente fue, ante todo, un padre profundamente dedicado a sus hijos, Gracia y Vicente, por quienes mostró una entrega constante, generosa y abnegada. Su preocupación por su bienestar y su disposición a acompañarlos y apoyarlos constituyeron una expresión particularmente entrañable de su carácter. Esa dimensión familiar, discreta pero fundamental, permite comprender mejor la personalidad de quien supo compatibilizar una intensa actividad académica con una dedicación incondicional a los suyos. Más allá de sus logros profesionales, encontraba en sus hijos una de sus principales razones de orgullo y satisfacción. Quienes lo conocimos sabemos que esa faceta de su vida fue tan importante para él como cualquiera de sus realizaciones científicas y, seguramente, mucho más.

Con su fallecimiento desaparece una figura estrechamente vinculada al desarrollo de la investigación sobre materiales carbonosos en la Universidad de Extremadura y a la historia de nuestra comunidad científica. Permanece, sin embargo, una herencia que va mucho más allá

de los resultados recogidos en sus publicaciones: los grupos de investigación a cuya consolidación contribuyó, los investigadores que ayudó a formar, los conocimientos transmitidos y las relaciones humanas construidas durante tantos años. A ese legado profesional se une otro, igualmente valioso, construido en el ámbito familiar mediante el afecto, la generosidad y la dedicación cotidiana.

Recordar a Vicente Gómez Serrano es, en definitiva, recordar una forma de entender la universidad y la ciencia basada en el trabajo riguroso, la perseverancia, la colaboración y el compromiso con las personas. Pero es también recordar a un hombre profundamente familiar, que hizo de la dedicación a sus hijos una parte esencial de su existencia. Quienes compartimos con él una parte de ese recorrido conservaremos su recuerdo con afecto y gratitud. Su legado científico seguirá presente en nuevas investigaciones, pero su huella más duradera permanecerá en quienes tuvimos el privilegio de aprender y trabajar a su lado y, muy especialmente, en aquellos a quienes dedicó lo mejor de sí mismo.

Gracias por todo, Vicente.



Figura 1. Integrantes del Grupo de Investigación ACA (Adsorbentes Carbonosos/Adsorción) de la Universidad de Extremadura, liderado durante décadas por el Prof. Dr. Vicente Gómez-Serrano, investigador principal del grupo. De izquierda a derecha, fila superior: Antonio Macías, Eduardo Cuerda, Vicente Gómez-Serrano, Carmen Fernández, María Alexandre, Mara Olivares y Manuel Alfaro. Fila inferior: Felipe Martín, Adrián Bogeat y César Troca. Fotografía tomada aproximadamente en 2012.

Socios protectores del Grupo Español del carbón



Química del Nalón

