

Silvia Román Suero  
Diego Carmona Fernández  
Diego Rodríguez Méndez  
(Coords.)

# Experiencias de investigación para un futuro sostenible





Experiencias de  
investigación para un  
futuro sostenible



Silvia Román Suero  
Diego Carmona Fernández  
Diego Rodríguez Méndez  
(Coords.)

Experiencias de  
investigación para un  
futuro sostenible

Octaedro 

Colección Universidad

Título: *Experiencias de investigación para un futuro sostenible*

Primera edición: julio de 2021

© Silvia Román Suero, Diego Carmona Fernández, Diego Rodríguez Méndez  
(coords.)

© De esta edición:  
Ediciones OCTAEDRO, S.L.  
C/ Bailén, 5 – 08010 Barcelona  
Tel.: 93 246 40 02  
octaedro@octaedro.com  
www.octaedro.com

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, [www.cedro.org](http://www.cedro.org)) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

ISBN: 978-84-18819-17-9  
DOI: <https://doi.org/10.36006/16289>

Maquetación: Fotocomposición gama, sl  
Diseño y producción: Octaedro Editorial

# Sumario

1. Cinética de la adsorción de contaminantes en carbones activados . . . . .	9
CARMEN MARÍA GONZÁLEZ GARCÍA; BEATRIZ LEDESMA CANO; EDUARDO SABIO REY	
2. Influencia del estado funcional de los motores térmicos en la eficiencia energética del buque . . . . .	19
YOLANDA AMADO SÁNCHEZ; VANESA DURÁN GRADOS; JUAN MORENO GUTIÉRREZ; FÁTIMA CALDERAY CAYETANO	
3. Análisis de la actividad muscular en hipoterapia . . . . .	35
M.ª DOLORES APOLO ARENAS; NEREA CÁCERES PÍRIZ; ALEJANDRO CAÑA PINO; JOSÉ A. PARRACA	
4. Influencia del contenido de azufre en el combustible utilizado en el transporte marítimo sobre la calidad del aire . . . . .	45
FÁTIMA CALDERAY CAYETANO; JUAN MORENO GUTIÉRREZ; YOLANDA AMADO SÁNCHEZ; RUBÉN RODRÍGUEZ MORENO; ANTONIO RAMÍREZ SÁNCHEZ; EMILIO PÁJARO VELÁZQUEZ; VANESA DURÁN GRADOS	
5. Investigación en desarrollo del potencial de aislamiento térmico de una envolvente que integra materiales tradicionales y ecológicos acompañados de sistemas inteligentes básicos para edificaciones en la ciudad de Quito. . . . .	55
LUIS FREIRE AMORES	

6. Degradación medioambiental y crecimiento económico: la hipótesis EKC para España y Portugal . . .	71
ISMAEL PÉREZ FRANCO; AGUSTÍN GARCÍA GARCÍA	
7. Hidrocarbonización. De promesa a escala laboratorio a realidad industrial . . . . .	93
JUAN FÉLIX GONZÁLEZ GONZÁLEZ; BEATRIZ LEDESMA CANO; SILVIA ROMÁN SUERO	
8. Realidad virtual para formación, divulgación y gestión de instalaciones de depuración de aguas residuales. . .	107
MARCOS GARRIDO HERRERA; PEDRO TOMÁS MARTÍN DE LA VEGA MANZANO; MIGUEL ÁNGEL JARAMILLO MORÁN; FÁTIMA FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ; DIEGO CARMONA FERNÁNDEZ; MARÍA ISABEL FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ	
9. Contornos activos aplicados para la reconstrucción 3D de estructuras anatómicas . . . . .	119
VALENTÍN MASERO; JOSÉ MORENO	
10. Antioxidantes naturales como aditivos sostenibles para la mejora de la estabilidad a la oxidación de biodiésel . . . . .	133
SERGIO NOGALES DELGADO; JOSÉ MARÍA ENCINAR MARTÍN; JUAN FÉLIX GONZÁLEZ GONZÁLEZ; ANDRÉS ÁLVAREZ	
11. Taxonomía de amenazas, vulnerabilidades y buenas prácticas para el desarrollo seguro de software . . . . .	151
JOSÉ CARLOS SANCHO NÚÑEZ; ANDRÉS CARO LINDO; JOSÉ MÉNDEZ CHAVES; PABLO GARCÍA RODRÍGUEZ	
12. Caracterización de contaminantes emergentes y capacidad de remoción en aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones rurales con tecnología de humedales artificiales . . . . .	161
MARÍA ISABEL FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ; PEDRO TOMÁS MARTÍN DE LA VEGA MANZANO; MARÍA DEL ROSARIO PALOMO MARÍN; MIGUEL ÁNGEL JARAMILLO MORÁN; FÁTIMA FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ	
Sobre los coordinadores . . . . .	177



# Cinética de la adsorción de contaminantes en carbones activados

## *Kinetics of adsorption of activated carbons*

CARMEN MARÍA GONZÁLEZ GARCÍA

BEATRIZ LEDESMA CANO

EDUARDO SABIO REY

Escuela de Ingenierías Industriales,

Universidad de Extremadura

### Resumen

Los compuestos fenólicos son unos de los contaminantes más importantes presentes en las aguas, debido a la abundancia en que se encuentran en vertidos industriales y su difícil sustitución en los procesos que los generan. La técnica de adsorción en sólidos adsorbentes es ampliamente utilizada en la eliminación de los mismos y, por tanto, continúa siendo objeto de estudio de numerosas investigaciones. El objetivo principal de este trabajo ha sido la puesta a punto de una metodología experimental que permita sistematizar el estudio cinético de procesos de adsorción de contaminantes presentes en las aguas. En concreto, en este trabajo se ha estudiado la cinética de la adsorción en disolución de p-Nitrofenol, como compuesto fenólico modelo, en carbones activados comerciales con diferentes características texturales y geométricas. Los resultados obtenidos pueden ser una herramienta de gran utilidad en estudios de procesos de adsorción, tanto a escala de laboratorio como a escala industrial.

**Palabras clave:** adsorción, p-Nitrofenol, carbones activados.

### Abstract

Phenolic compounds are one of the most important pollutants present in water, due to the abundance in which they are found in industrial discharges and their difficult replacement in the processes that generate them. The adsorption technique on adsorbent solids is widely used in their removal and, therefore, continues to be the aim of study in numerous investigations. The main objec-

tive of this work has been the development of an experimental methodology that allows systematizing the kinetic study of adsorption processes of pollutants present in water. Specifically, this work has studied the kinetics of adsorption in solution of p-nitrophenol, as a model phenolic compound, in commercial activated carbons with different textural and geometric characteristics. The results obtained can be a very useful tool in studies of adsorption processes, both on a laboratory scale and on an industrial scale.

**Keywords:** adsorption, p-Nitrophenol, activated carbons.

## Introducción

En este trabajo se ha realizado la puesta a punto de la metodología experimental para llevar a cabo de forma sistemática el estudio cinético del proceso de adsorción de contaminantes, en concreto se han empleado como adsorbentes carbones activados comerciales, de características texturales y geométricas conocidas, y como contaminante, un compuesto fenólico modelo, p-Nitrofenol (PNF). Por tanto, este trabajo está comprometido con la sociedad y el medioambiente.

## Metodología

El p-Nitrofenol (PNF) ha sido utilizado como adsorbato en este trabajo. Se trata de un compuesto fenólico suministrado por Sigma-Aldrich S.A, con riqueza del 99%. El método de análisis fue el método espectrofotométrico, que consiste en la medida de la absorbancia de las disoluciones a la longitud de onda correspondiente al máximo de absorción. La absorbancia de las muestras se determinó mediante espectrofotometría UV-VIS a la longitud de onda,  $\lambda$  de 225 nm (espectrofotómetro Genesys 10S UV-VIS).

Para llevar a cabo el estudio cinético del proceso de adsorción se emplearon cinco carbones activados comerciales con diferentes características texturales y geométricas. Dos de ellos son de la casa Chemviron Carbon, Carbsorb 40 (CB) y Filtrasorb 400 (FI). Los carbones CB y FI son carbones granulares preparados a partir de hulla bituminosa. También se han utilizado otros dos tipos de carbones activos granulares con un tamaño de grano mayor

que los dos anteriores. Uno de ellos es el carbón activo granulado n.º 3 QP del grupo Panreac (PA), y el otro es el Darco de Acros Organics (DA). Finalmente, el quinto adsorbente utilizado ha sido el carbón activo CA0346 (PE), de la casa Scharlau; a diferencia de los otros carbones utilizados, los granos de este carbón presentan forma de pellets. Para la caracterización textural y geométrica de los carbones activados se emplearon las técnicas de adsorción física de N<sub>2</sub> a 77 K, porosimetría de mercurio y estereopícnometría de helio. Los datos experimentales de volumen de N<sub>2</sub> adsorbido fueron analizados empleando los métodos: a) modelo de Brunauer, Emmett y Teller (B.E.T.) para el cálculo de la superficie específica B.E.T. (SBET); b) método de Dubinin-Radushkevich (DR) para el volumen de microporos (V<sub>mi</sub>) y procedimiento de Gregg y Sing para la estimación del volumen de mesoporos (V<sub>me</sub>). Los datos de porosimetría de mercurio fueron empleados para obtener la densidad de partícula ( $\rho_p$ ) de los sólidos adsorbentes. La determinación de la densidad por desplazamiento de helio ( $\rho_v$ ) junto con los de  $\rho_p$  permitieron obtener la porosidad de las partículas ( $\epsilon$ ).

El método experimental seguido para estudiar la adsorción en condiciones de equilibrio ha sido el método de inmersión, que consiste en mantener en contacto, en régimen de agitación y temperatura constantes, una determinada cantidad de adsorbente con un volumen de disolución de adsorbato de concentración conocida, hasta que se alcance el equilibrio de adsorción-desorción. De este modo, si disoluciones de adsorbato de diferente concentración se ponen en contacto con una misma cantidad de adsorbente o viceversa, se puede definir la correspondiente isoterma de adsorción a partir de la representación de la cantidad adsorbida ( $q_e$ , mg · g<sup>-1</sup>), frente a la concentración de adsorbato en equilibrio ( $c_e$ , mg · L<sup>-1</sup>).

Para la puesta a punto de la metodología del estudio cinético de la adsorción se ha empleado una instalación experimental, donde se realizaba toma de muestras de las disoluciones de PNF en el espectrofotómetro con una cubeta de cuarzo de flujo continuo cada 2 min.

## Resultados

En la tabla 1.1 se muestran las características texturales y geométricas de los carbones. Desde el punto de vista de la caracterización textural de los carbones activados, se puede observar que las diferentes muestras presentan un distinto desarrollo de superficie específica variando desde valores de 1040 hasta 627  $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$  para la muestra FI y DA, respectivamente. Todos los carbones presentan un mayor volumen de microporos que de mesoporos, excepto el carbón DA que presenta valores similares. Por otro lado, cabe destacar el casi despreciable volumen de mesoporos de los carbones CB y PA.

**Tabla 1.1.** Características texturales y geométricas de los carbones

	CB	DA	FI	PA	PE
$S_{\text{BET}}$ ( $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ )	930	627	1040	926	799
$V_{\text{mi}}$ ( $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ )	0.49	0.31	0.57	0.51	0.43
$V_{\text{me}}$ ( $\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$ )	0.063	0.395	0.141	0.027	0.119
$\rho_p$ ( $\text{g}.\text{cm}^{-3}$ )	1.0241	0.6945	1.001	0.9475	0.8575
$q_v$ ( $\text{g}.\text{cm}^{-3}$ )	2.2208	2.0508	2.3614	2.1461	2.2418
$\epsilon$	0.539	0.661	0.577	0.559	0.617
$\emptyset_p$ (mm)	1.27	3.4	1.57	3.3	0.99*5.05**
$S_p$ ( $\text{mm}^2$ )	5.07	36.32	7.74	34.21	17.25
$V_p$ ( $\text{mm}^3$ )	1.07	20.58	2.03	18.82	3.89
$S_p/V_p$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	4.72	1.76	3.82	1.82	4.44
$m_p$ (mg)	1.10	14.29	2.03	17.83	3.33

\*  $\emptyset_p$ ; \*\* h

En cuanto a la densidad de las partículas, la muestra DA presenta un valor menor de  $\rho_p$  que las otras, que tienen un valor similar en torno a la unidad. Por el contrario,  $q_t$  es muy similar para todas las muestras, por ello el carbón DA es el que presenta mayor desarrollo de porosidad,  $\epsilon$ .

Del mismo modo, los carbones activados presentan importantes diferencias en cuanto a sus características geométricas. Como puede observarse, el diámetro medio de partícula ( $\emptyset_p$ ), es muy similar para el caso de CB-FI y DA-PA. A partir de dicho valor y asumiendo una geometría esférica de las partículas para to-

dos los carbones (excepto la muestra PE considerada cilíndrica), los correspondientes valores de superficie de partícula ( $S_p$ ), volumen de partícula ( $V_p$ ), así como su correspondiente ratio ( $S_p/V_p$ ) fueron calculados.

Sabio *et al.* encontraron que dicho ratio ejercía un papel muy importante en la cinética del proceso de adsorción, mostrando que existía una correlación inversa entre ambos parámetros.

En trabajos previos se obtuvieron las isotermas de adsorción de equilibrio ( $q_e$  vs.  $c_e$ ) del PNF en los carbones. Las isotermas de adsorción fueron ajustadas al modelo de adsorción de Langmuir y Doble-Langmuir.

Para realizar la introducción de los datos y el ajuste de los modelos se ha desarrollado una hoja Excel (figura 1.1), mediante la cual se automatiza dicho análisis, lo que facilita el mismo y reduce los errores en la manipulación de los datos.

Los resultados obtenidos del ajuste se muestran en la tabla 1.2, donde como se puede observar a partir de los valores del coeficiente de regresión  $R^2$ , para todos los casos el ajuste a la ecuación de Doble-Langmuir es mejor que a la de Langmuir simple.

De los ajustes realizados cabe destacar que el carbón DA es el que presentaba la menor capacidad de adsorción (tanto de  $q_{\max1}$  como de  $q_{\max2}$ ).

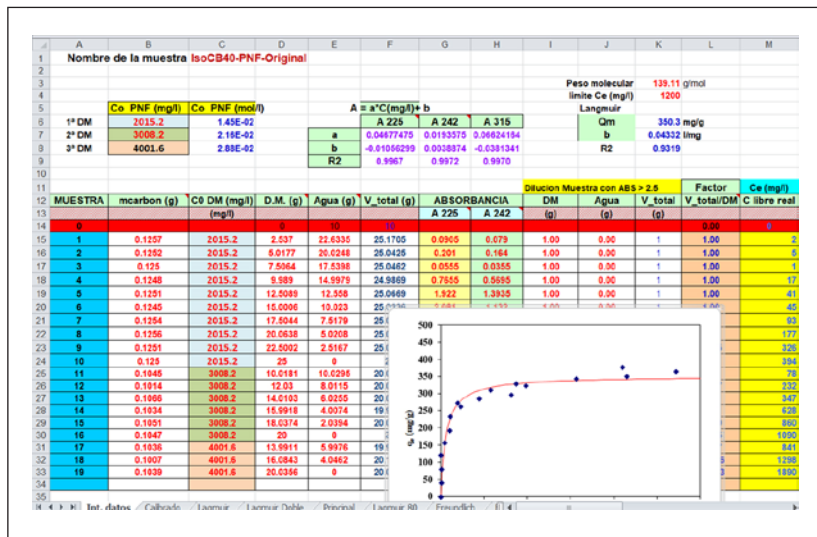
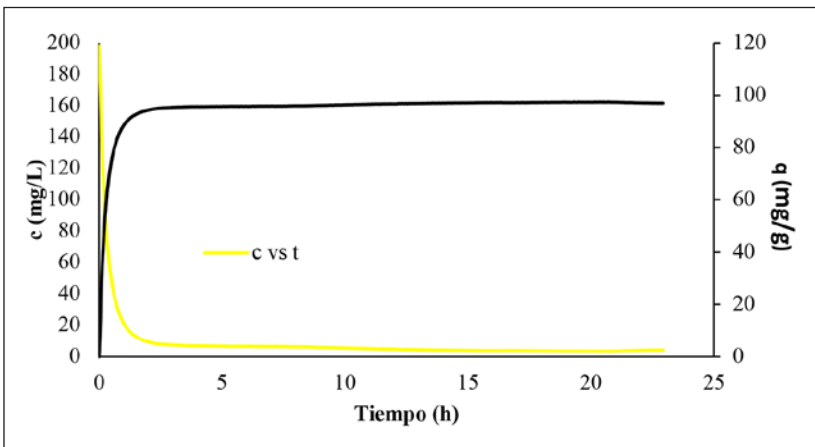


Figura 1. Hoja de cálculo Excel para el análisis de las isotermas de adsorción.

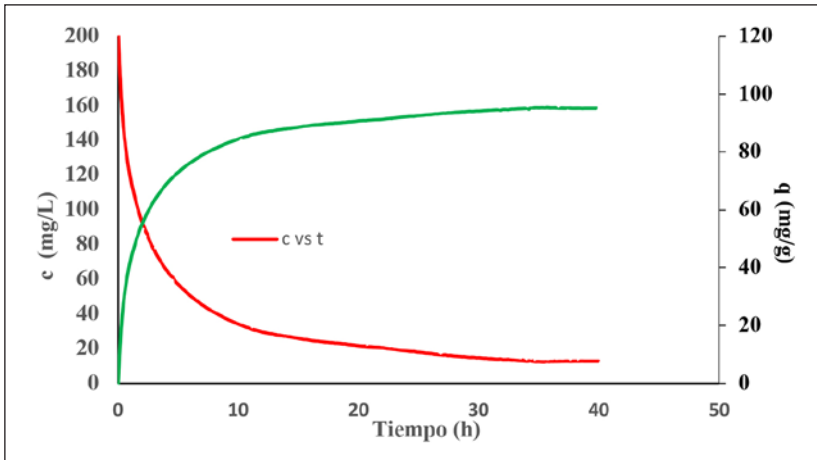
**Tabla 1.2.** Resultados obtenidos del ajuste de las isotermas de adsorción de PNF al modelo de Langmuir y Doble-Langmuir

Langmuir			Doble-Langmuir					
Carbón	$q_{\max}$ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$b_1$ ( $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ )	$R^2$	$q_{\max 1r}$ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$b_{1r}$ ( $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ )	$q_{\max 2r}$ ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$b_{2r}$ ( $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ )	$R^2$
CB	359.5	0.1704	0.9177	281.3	0.130	423.2	$5.9 \cdot 10^{-4}$	0.9213
DA	218.7	0.0962	0.9435	186.9	0.072	230.6	$5.18 \cdot 10^{-4}$	0.9515
FI	360.0	0.2369	0.9220	281.0	0.202	435.8	$4.11 \cdot 10^{-4}$	0.9501
PA	360.7	0.0253	0.9608	337.5	0.036	435.8	$2.10 \cdot 10^{-5}$	0.9713
PE	380.3	0.0805	0.9131	360.0	0.089	433.0	$1.24 \cdot 10^{-4}$	0.9147

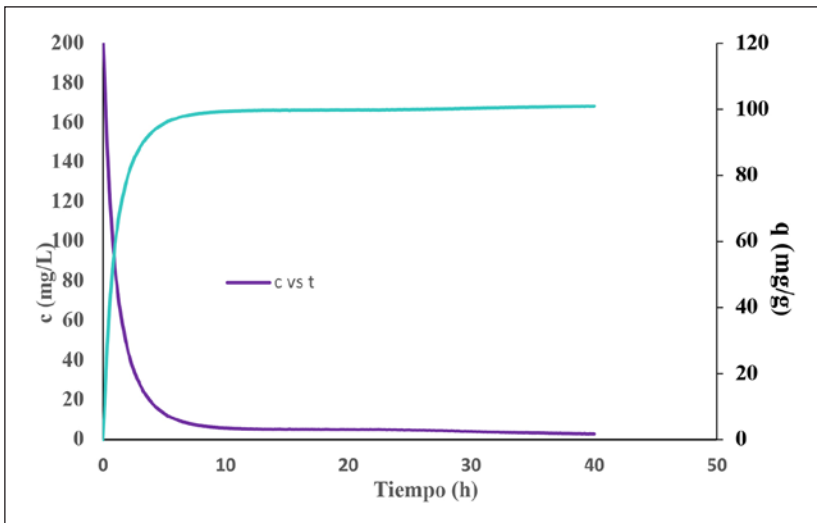
Las figuras 1.2 a 1.6 muestran las curvas cinéticas de evolución de la concentración de PNF en el seno del líquido ( $c$ ) y en el sólido ( $q$ ) con el tiempo para cada uno de los carbones. Como se puede observar, en todos los casos en los momentos iniciales se produce una disminución brusca de la concentración de soluto en la solución ( $c$ ), con el consecuente aumento de la adsorción en la partícula ( $q$ ).



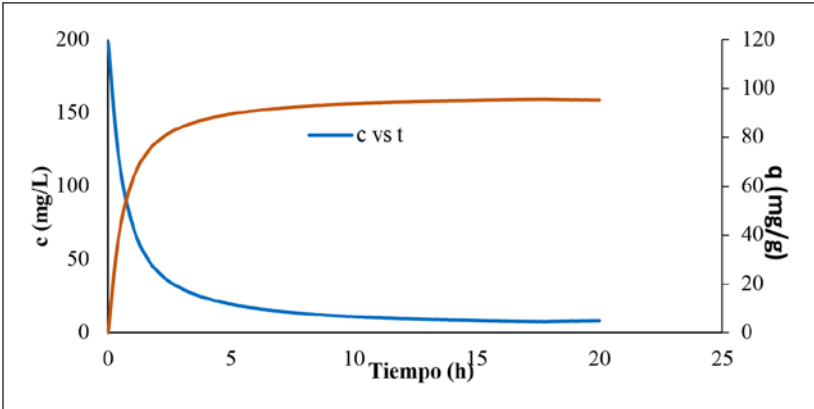
**Figura 1.2.** Valores experimentales de la cinética de adsorción de PNF en el seno de la dilución ( $c$ ) y en la partícula ( $q$ ). Carbón activado CB.



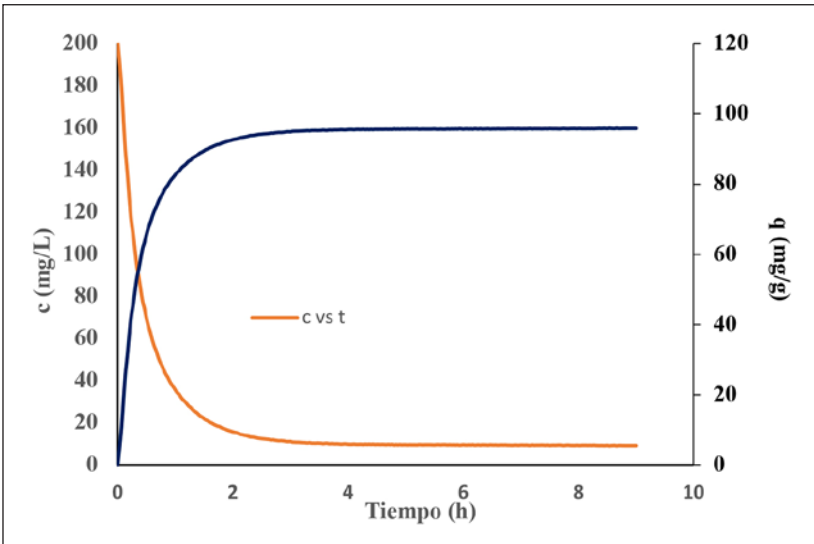
**Figura 1.3.** Valores experimentales de la cinética de adsorción de PNF en el seno de la dilución (c) y en la partícula (q). Carbón activado DA.



**Figura 1.4.** Valores experimentales de la cinética de adsorción de PNF en el seno de la dilución (c) y en la partícula (q). Carbón activado FI.



**Figura 1.5.** Valores experimentales de la cinética de adsorción de PNF en el seno de la dilución (c) y en la partícula (q). Carbón activado PA.



**Figura 1.6.** Valores experimentales de la cinética de adsorción de PNF en el seno de la dilución (c) y en la partícula (q). Carbón activado PE.

En la figura 1.7 se muestra la comparativa del comportamiento cinético en el seno de la disolución de las cinco muestras. Como se puede apreciar, en las muestras con mayor tamaño de partícula DA y PA (tabla 1.1), la cinética del proceso de adsorción es más lenta que en el caso de las otras muestras (PE y FI comportamiento muy similar y CB la más rápida). Probable-



mente, este hecho esté relacionado con que las muestras DA y PA son las que presentan un valor menor y similar relación superficie/volumen,  $S_p/V_p$  (tabla 1.1) y la CB, el mayor.

En las muestras CB, FI y PE, la transferencia de masa de PNF de la solución a la partícula disminuye drásticamente en torno a los primeros 30 min, y el equilibrio se alcanza entre los 120-160 min aproximadamente. Dicha transferencia es mucho más gradual, como ya se ha señalado, en el caso del carbón PA y sobre todo en el DA.

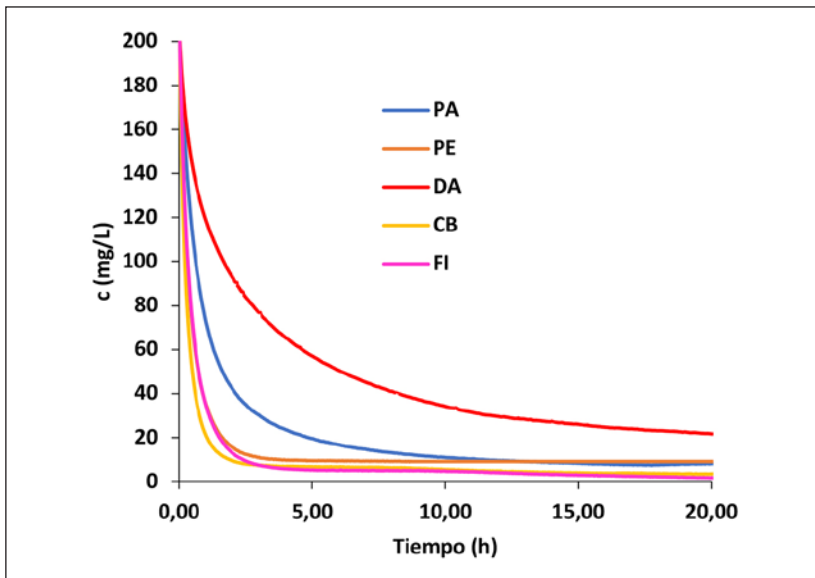


Figura 1.7. Comparativa de los valores experimentales de la cinética de adsorción de PNF en el seno de la dilución (c).

## Conclusiones

Se ha realizado la puesta a punto de la metodología experimental para llevar a cabo de forma sistemática el estudio cinético en flujo continuo del proceso de adsorción del PNF en carbones activados.

## Referencias

- Bhatti, Z. I. *et al.* (2002). P-Nitrophenol degradation by activated sludge attached on nonwovens. *Water Research*, 36, 1135-1142.
- Gregg, S. J. *et al.* (2016). *Adsorption, surface area and porosit.* Academic Press.
- Sabio, E. *et al.* (2016). *Nanoscale Res. Lett.*, 11 (1), 671.

# Influencia del estado funcional de los motores térmicos en la eficiencia energética del buque

*Influence of the functional state of thermal engines on the energetic efficiency of ships*

YOLANDA AMADO SÁNCHEZ

VANESA DURÁN GRADOS

JUAN MORENO GUTIÉRREZ

Escuela de Ingeniarías Marina, Náutica  
y Radioelectrónica, Universidad de Cádiz

[direccion.nautica@uca.es](mailto:direccion.nautica@uca.es)

FÁTIMA CALDERAY CAYETANO

Escuela Superior de Ingeniería,

Campus Universitario de Puerto Real, Cádiz

## Resumen

Atendiendo a la normativa actual (Anexo VI de MARPOL 73/78) que establece un límite de emisiones en función de las revoluciones del motor, basado en pruebas realizadas con motores de nueva fabricación y en bancos de pruebas, se encuentra en desarrollo, en sus fases finales, una tesis doctoral que demostrará que el estado funcional de los motores marinos de alta potencia ha de considerarse como algo fundamental para disminuir las emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera. Con los estudios llevados a cabo se demostrará que no es suficiente tomar valores de referencia en bancos de prueba, sino que, debido a que durante la fase de operatividad los motores pueden sufrir ciertos desajustes, se debería tener en cuenta estas circunstancias, y realizar un control más exhaustivo de las emisiones producidas en condiciones normales de funcionamiento a bordo. Además, habría que tener en cuenta los límites que se sobrepasan cuando el motor trabaja con un exceso de horas de funcionamiento y próximo a su parada por mantenimiento. Comprobaremos que, tras

el reemplazo de los inyectores y ajuste del sistema de inyección en general, el motor disminuiría sus emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y PM fundamentalmente.

Basándonos en estos cálculos comparativos en la medición de emisiones de contaminantes de motores marinos antes y después de la realización del mantenimiento por *overhaul*, se estaría en condiciones de proponer un modelo óptimo de operación que minimice las emisiones.

**Palabras clave:** emisiones, eficiencia energética, mantenimiento *overhaul*.

### Abstract

In accordance with the current regulations (Annex VI of MARPOL 73/78) that establishes a limit of emissions in the function of engine revolutions, based on tests carried out with newly manufactured engines and on test benches, it is in the development, In its final stages, a doctoral thesis that demonstrates that the functional status of high-power motors has been considered as fundamental to reduce the emissions of pollutants emitted into the atmosphere. With the studies carried out it will be demonstrated that reference values in the test benches are not enough, but also in the operation phase. more exhaustive control of emissions produced under normal operating conditions on board. Also, I have to take into account, the limits that are exceeded when the engine works with an excess of hours of operation, and close to its stop for maintenance. It is verified, fundamentally, the replacement of the injectors and the adjustment of the injection system in general, the engine would reduce its emissions of NO<sub>x</sub>, CO and PM.

On the basis of the realization of these comparative calculations in the management of pollutant emissions from marine engines, before and after carrying out maintenance, they are in a position to propose an optimal operating model that minimizes emissions

**Keywords:** emissions, energy efficiency, maintenance overhaul.

## Introducción

Las emisiones atmosféricas de contaminantes procedentes de los buques, han tomado gran importancia durante la última década sobre todo porque los motores marinos contribuyen en un porcentaje importante a la degradación del medioambiente, aunque con un menor nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada y kilómetro transportado comparado con otros medios de transporte. [1].

Por otro lado, las emisiones de SO<sub>x</sub>, junto con NO<sub>x</sub>, dan lugar a la formación de partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) [2]; después de la

combustión dentro del motor, el azufre contenido en el combustible se convierte en dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en la cámara de combustión, y una pequeña cantidad (1 % ~ 2 %) se oxida y se convierte en trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y es emitido directamente como PM [3]. Las emisiones de  $\text{NO}_x$  también contribuyen para aumentar la capa de ozono( $\text{O}_3$ ).



Figura 2.1. Buque en aguas del Estrecho de Gibraltar. Fuente: elaboración propia.

En este sentido, J. J. Winebrake estimó un total de 87 000 muertes anuales por cánceres cardiopulmonares y respiratorios causados por las emisiones de  $\text{PM}_{2,5}$  procedentes del transporte marítimo [4].

Las emisiones contaminantes atmosféricas procedentes de otras fuentes como el área de la industria, industria automotriz y vehículos son conocidas y controladas [5, 6, 7, 8, 9]. Sin embargo, aún no hay un acuerdo unánime sobre qué procedimiento emplear para el cálculo de los inventarios de emisiones procedentes del transporte marítimo. Dicho cálculo depende de ciertos parámetros entre los que se encuentran los valores de los factores de emisión de cada contaminante que los motores térmicos marinos emiten a la atmósfera como son los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxidos de azufre, hidrocarburos ( $\text{HC}$ ) y partículas, así como de gases de efecto invernadero ( $\text{GEI}$ ). Como en todo tipo de inventarios dentro de este ámbito, existe una serie de incertidumbres siempre relacionadas con los parámetros que intervienen en el cálculo final.

El estado funcional de los motores nunca es cuantificado en los inventarios de emisiones procedentes del transporte marítimo, a pesar de que tiene una clara influencia sobre la cantidad que emite de cada uno de estos contaminantes, principalmente los NO<sub>x</sub>, CO y material particulado. El estado funcional de los motores marinos de alta potencia influirá sobre la producción de estos contaminantes, se dedicará el estudio propuesto basado fundamentalmente en el estado de conservación de las toberas, inyectores, aire de aspiración y, en general todos los elementos que intervienen en el proceso de combustión.

El análisis se efectuará sobre varios motores de potencia próxima a los 5 000 kW y de alta velocidad en dos fases:

1. Funcionando con los sistemas de combustión y aire en las condiciones correspondientes a un número elevado de horas de funcionamiento que suponga una parada próxima para realizar el mantenimiento correspondiente a las 5 000 horas de funcionamiento.
2. Toma de datos una vez revisado y ajustado el motor.

La normativa actual (Anexo VI de MARPOL 73/78) establece un límite de emisiones en función de las revoluciones del motor, pero este límite está basado en pruebas realizadas con motores de nueva fabricación y en banco de pruebas. Sin embargo, no se hace referencia alguna a los límites que se pueden sobrepasar cuando el motor se encuentra en un mal estado de funcionamiento como por ejemplo con toberas e inyectores en mal estado, mala sincronización de la inyección, problemas con la temperatura y humedad del aire de aspiración, con excedente de horas de funcionamiento sin revisión, etc.

Las emisiones procedentes de los motores diésel marinos se componen principalmente de NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>x</sub> y material particulado (PM), como se ha expuesto anteriormente. De los mencionados solo las emisiones de NO<sub>x</sub> están limitados en los motores diésel marinos por medio de una regulación internacional (Anexo VI, MARPOL) aprobada por la Organización Marítima Internacional. La limitación de NO<sub>x</sub> se define en la regla 13 del Anexo VI del MARPOL 73/78. El 1 de enero de 2011 entró en vigor el límite de emisión nivel II, estando vigente hasta el 1 de enero de 2016, que entró en vigor el límite de nivel III.

Aunque los SO<sub>x</sub> no están cuantificados mediante Normativa, sin embargo, para evitar la formación de partículas, se limita el contenido de azufre en los combustibles. Los límites de contenido de azufre en los combustibles se establecen en la regla 18 del MARPOL Anexo VI.

Por otro lado, se ha comprobado que si los motores consumen fueloil pesado con alto contenido de azufre, existe una fuerte dependencia de la emisión de PM con el contenido de azufre en el combustible [10, 11]. Esto significa que una reducción del contenido de azufre en el combustible ocasiona una reducción directa de PM en los gases de escape. El límite de contenido de azufre en el combustible actualmente se ha reducido al nivel III [12].

También, como ya es conocido, la principal fuente de formación de NO<sub>x</sub> es la oxidación del nitrógeno atmosférico a altas temperaturas que se produce en la combustión; cuanto mayor temperatura de combustión y mayor tiempo manteniendo dicha temperatura, mayor será la formación de NO<sub>x</sub>.

El NO<sub>x</sub> se forma en la cámara de combustión por la combinación de nitrógeno y oxígeno en condiciones de alta presión y alta temperatura. Aunque el combustible tiene algo de nitrógeno y oxígeno en su composición, la fuente principal de la formación de NO<sub>x</sub> es la combinación de nitrógeno atmosférico y el oxígeno. Como es sabido, los principales mecanismos de formación son el conocido mecanismo térmico (mecanismo de Zeldovich), el mecanismo indicador de NO (mecanismo Fenimore) y el mecanismo de nitrógeno contenido en el combustible. El NO<sub>x</sub> térmico es de alrededor de 70 % del total de NO<sub>x</sub> en las condiciones de la cámara de combustión en un motor diésel de velocidad media [13]. El mecanismo Zeldovich es el responsable de la mayoría de las emisiones de NO<sub>x</sub> procedentes de los motores diésel cuando la temperatura de combustión excede los 2000 °K. El mecanismo Fenimore es muy rápido y se forman en la zona de combustión.

Por tanto, es fácilmente deducible que cuanto menor sea el valor de la temperatura a la que se produce la combustión y cuanto más rápida sea esta, menor será la formación de NO<sub>x</sub>. Pero ambas circunstancias influyen negativamente en el rendimiento del motor, por lo que, en principio, las medidas para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> se deberían basar fundamentalmen-

te en la reducción de la temperatura máxima de combustión y la reducción del tiempo de combustión mediante procedimientos que no impliquen una reducción del rendimiento, aunque la mayoría de ellas tienden a reducir la temperatura máxima de combustión, ya que la formación de NOx es una función exponencial de la temperatura [14]. De hecho, la proporción de NOx suele incrementarse por un factor de proporción de 10 por cada 100°K de aumento de temperatura [15].

Debido a esto, los principales métodos de reducción de emisiones de NOx en el motor se centran en la reducción de la temperatura de combustión máxima y la duración de la combustión. Estos métodos de limitación de emisiones en el motor han traído como consecuencia una disminución de la eficiencia energética de los motores diésel [16]. Esta característica de la formación de NOx se contempla en la Regla 13 del Anexo VI y los límites de emisión específicos son mayores cuanto menor es la velocidad del motor. Cuanto más potencia y volumen tenga el motor, por lo general, más lenta es la velocidad del pistón durante la carrera, más adiabático es el proceso de combustión y, por lo tanto, mayores las temperaturas de combustión, con lo cual, mayor formación de NOx.

## Objetivos

Está justificado, por tanto, esta propuesta de estudio, cuyo objetivo principal sería desarrollar un análisis de la influencia que los cambios de presión en la inyección, el estado de conservación de las toberas, la sincronización del sistema de inyección y las condiciones de presión y temperatura del aire de aspiración ejercen sobre las emisiones al objeto de proponer un modelo adaptado a cada motor en particular que minimice las emisiones.

Los motores diésel instalados en la flota mundial tienen que cumplir con las regulaciones de emisiones 73/78 Anexo VI del Convenio MARPOL de la OMI, cuyo cumplimiento se comprueba en banco de pruebas; pero esta regla no exige comprobar su cumplimiento una vez instalado el motor a bordo. No existe ningún método para seguir comprobando el régimen de emisión a bordo, solo podemos comprobar, a través del histórico de mantenimiento de los motores marinos, si se ha cumplido con las horas de funcionamiento que propone el fabricante.





**Figura 2.2.** Inyector usado durante 5000 h e inyector nuevo para reemplazo. Fuente: elaboración propia.

En este estudio, se trata de demostrar que no es suficiente tomar valores de referencia en bancos de prueba, sino que se deben tener en cuenta las emisiones producidas en condiciones normales de funcionamiento a bordo, lo que exigiría que la toma de valores se realizara cuando los motores están instalados a bordo y efectuando su período de pruebas, con el fin de poder ajustar las condiciones de la instalación.

Posteriormente, una vez definido el modelo que relacione las emisiones con dichos parámetros, se podría predecir el estado funcional del motor.

Cabe recordar que, por cada dólar invertido en Estados Unidos en programas de reducción de emisiones, se obtienen 9 de beneficio en salud y medioambiente [17].

## Metodología

La metodología será la misma que especifica el Código técnico para la aplicación de la Regla 13 del Anexo VI del MARPOL 73/78 y que define los equipos que emplear para la toma de potencia en eje y emisiones en simultáneo, así como medidas de caudales de combustible y condiciones de presión, temperatura caudal y hu-

medad del aire de admisión. Se evitarían los aumentos bruscos de la temperatura del agua de refrigeración, que podría provocar un aumento de temperatura en las paredes de la cámara de combustión y reducir el calor de los gases de escape liberados. Teóricamente esto tendrá un efecto directo en la generación de NOx; un aumento de la temperatura de combustión provocará un aumento de la generación de NOx. De esta manera y según se contempla en el anexo 14 del documento MEPC 58/23 del Código técnico, el requisito para el sistema de refrigeración es solo que tiene que ser capaz de mantener el motor en las temperaturas normales de funcionamiento prescritas por el fabricante de motores.

Sin embargo, en el Código técnico no hay instrucciones claras acerca de la instalación del motor a bordo o condiciones que han de cumplirse cuando el motor está instalado o después de que el motor ha sido instalado a bordo. La única limitación es que el motor no puede sufrir ninguna modificación importante que pudiera causar un incremento en las emisiones.

Para las medidas de presión de inyección se podría emplear la siguiente cadena de medidas:

- un transductor de presión piezoeléctrico intrusivo PCB 108A02B,
- un regletero SCB-68,
- un PC portátil con la tarjeta de adquisición de datos PCMCIA 6062E.

Para la medida de presión de combustión en cámara se podría emplear una cadena de medida similar a la de presión de inyección, excepto que el transductor piezoeléctrico de presión sería del tipo PCB112B10, y, debido a sus características eléctricas, sería necesario emplear el amplificador de carga en línea modelo PCB422E, cuya salida se aplicaría a la entrada del amplificador PCB482A16 de cuatro canales, controlado digitalmente para los sistemas transductores ICP. Además de los transductores de presión aquí mencionados, se emplearía un sistema de dos transductores de proximidad con sus respectivos circuitos acondicionadores. También se emplearían termopares de tipo K para medidas de temperaturas y transmisores de presión DANFOSS para la medida de presión de sobrealimentación.

De esta manera, los resultados de las pruebas estarían referidos a medidas específicas (g/kWh) y a concentraciones de emi-

siones en los gases de escape (ppm), se aplicaría el método de balance de masas y el método del equilibrado del carbono según lo especificado en el código técnico del Anexo VI de Marpol 73/78; para ello se necesitaría conocer la composición del combustible y el flujo másico de combustible que entra al motor, así como la composición de los gases de escape ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SOX$ ,  $NOX$ ,  $THC$ ) con el objeto de establecer las ecuaciones de equilibrio por medio de las cuales se determinarían los flujos másicos de los componentes de los gases de escape.

La ubicación de las sondas de muestreo se colocaría conforme a la normativa vigente que establece 0,5 m como mínimo, o tres veces el diámetro del tubo de escape. Las medidas de potencia en ejes se realizarían mediante torsiómetro de par de galgas extensiométricas para los motores principales. Para los motores se tomarían potencias en tiempo real en cuadro eléctrico.

Las pruebas se realizarían de acuerdo con los ciclos de propulsión E2 y E3. Ciclo E2 es el ciclo de pruebas para la aplicación «velocidad constante de propulsión principal», en el que el motor funciona en revoluciones constantes y los cambios de carga se harían con hélice de paso variable o propulsión diésel eléctrico. EL ciclo E3 es el ciclo de pruebas teniendo en cuenta la «ley de la hélice, aplicable básicamente para los motores principales que se ejecutan con hélices de paso fijo».

## Resultados

Actualmente se están analizando todos los datos tomados a bordo de diferentes embarcaciones.

A continuación mostramos los resultados del análisis de gases de escape en el mismo motor después de realizarle un mantenimiento por *overhaul* de 5000 h de funcionamiento, donde fueron sustituidos los inyectores y la turbosoplante.

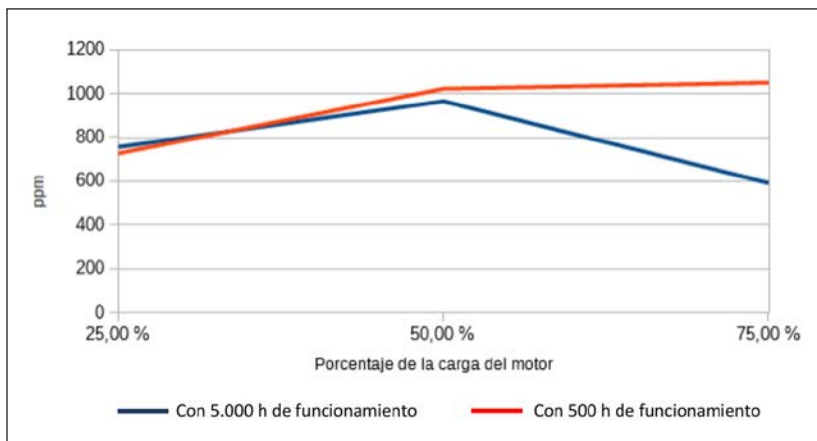
Tomamos dos medidas para cada carga del motor y obtenemos las siguientes emisiones de las distintas concentraciones contaminantes, como son los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de carbono y oxígeno.

**Tabla 2.1.** Resultados del análisis de gases de escape del motor antes del mantenimiento

Muestras tomadas antes de realizar el mantenimiento						
Carga (%)	NO (ppm)	CO (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> -IR (%)	O <sub>2</sub> (%)
25	760	155	4	41.1	5.49	13.75
25	753	160	18	34.1	5.47	19.97
50	964	191	7	40.2	6.59	12.21
50	975	181	0	43.4	6.66	12.18
75	623	137	0	21.6	4.18	15.46
75	561	104	0	17.4	4.01	16.17

**Tabla 2.2.** Resultados del análisis de gases de escape del motor después de efectuar el mantenimiento

Muestras tomadas después de realizar el mantenimiento						
Carga (%)	NO (ppm)	CO (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	NO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> -IR (%)	O <sub>2</sub> (%)
25	719	158	35	26.7	5.72	13.45
25	735	167	25	36.5	5.83	13.20
50	1000	259	48	32.4	8.07	10.46
50	1045	456	50	25.3	9.01	9.17
75	1041	589	51	24.3	9.38	8.7
75	1059	595	41	20.1	9.35	8.46



**Figura 2.3.** Concentración de NO.

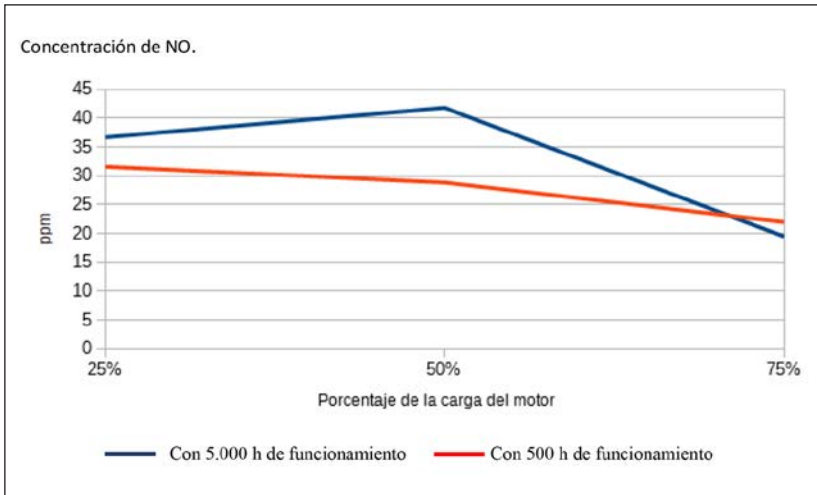


Figura 2.4. Concentración de NO<sub>2</sub>.

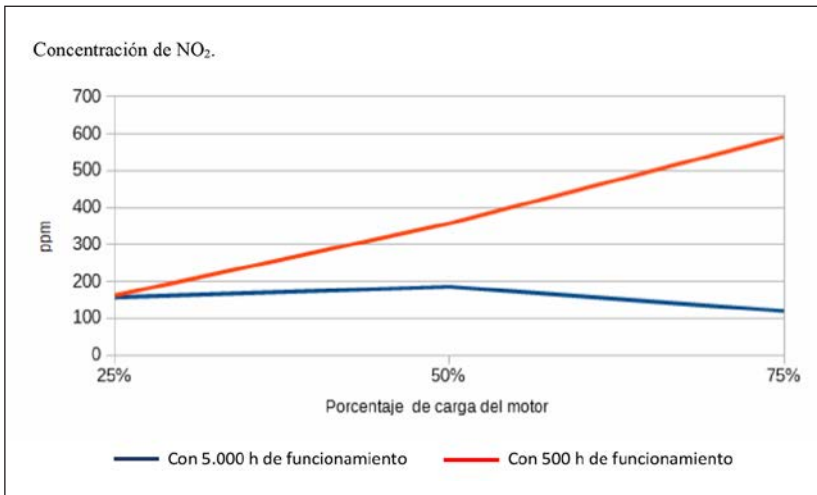


Figura 2.5. Concentración de CO.

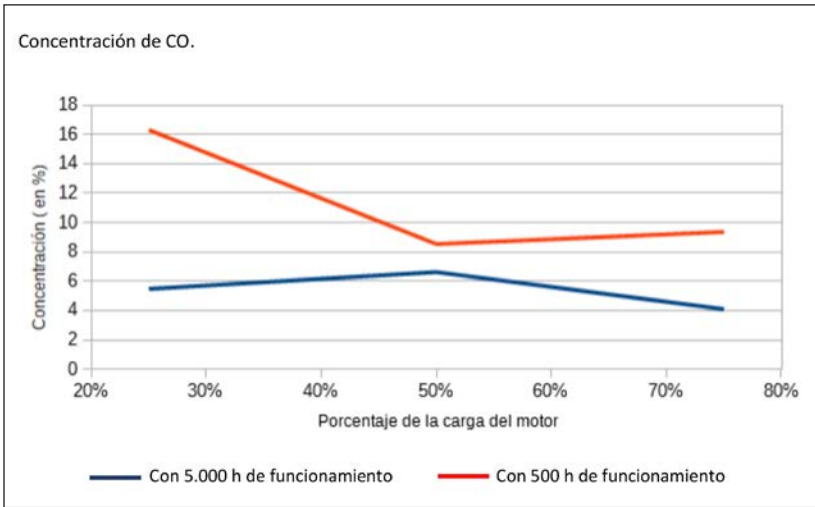


Figura 2.6. Concentración de CO<sub>2</sub>.

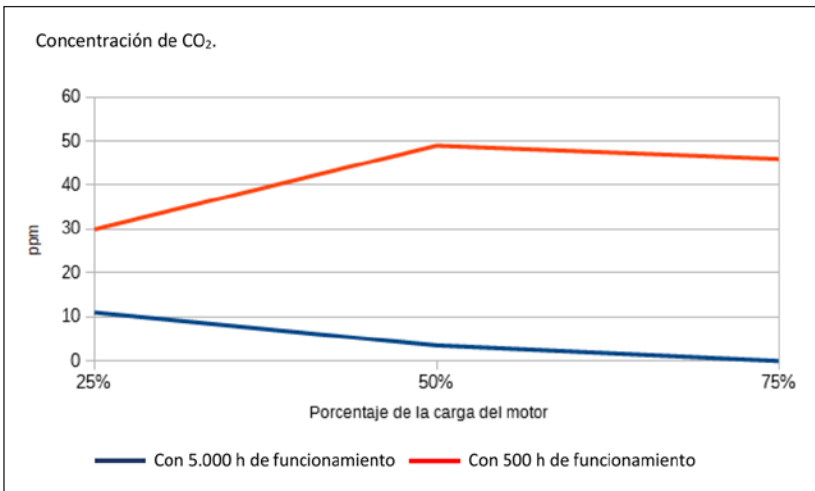


Figura 2.7. Concentración de SO<sub>2</sub>.

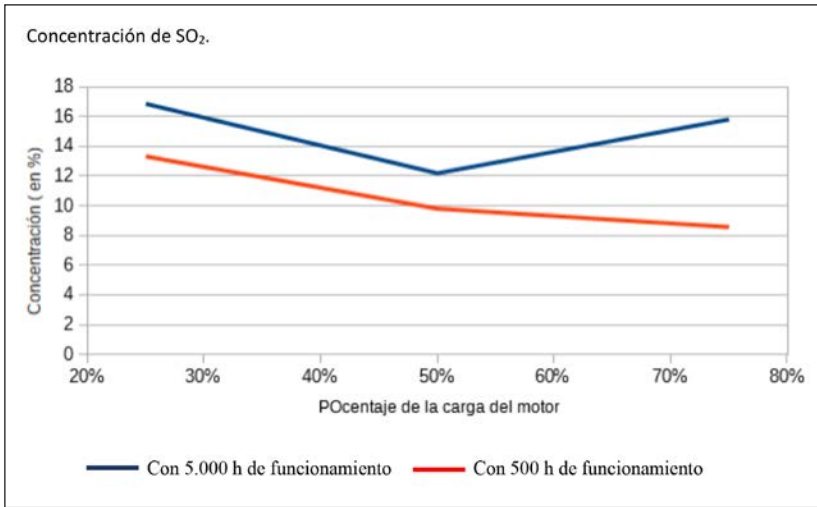


Figura 2.8. Concentración de O<sub>2</sub>.

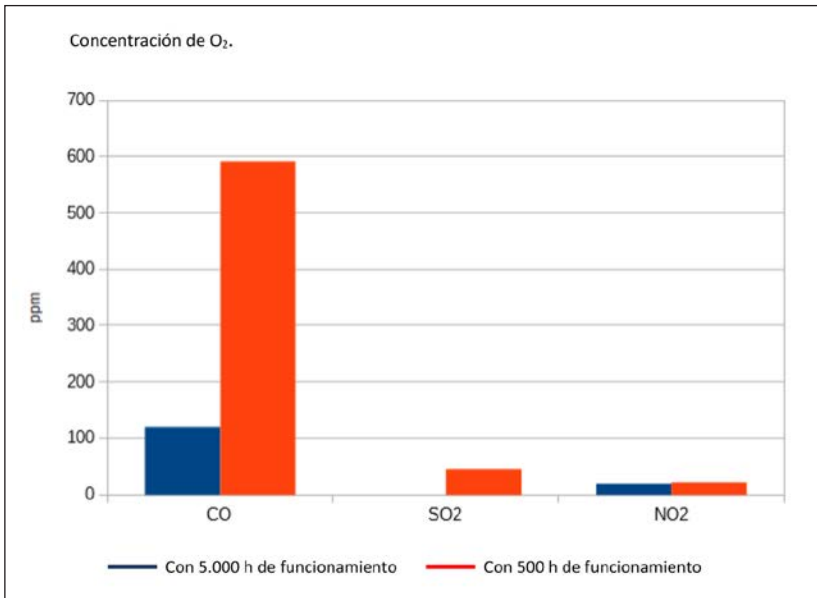


Figura 2.9. Comparativa de emisiones al 75% de la carga.

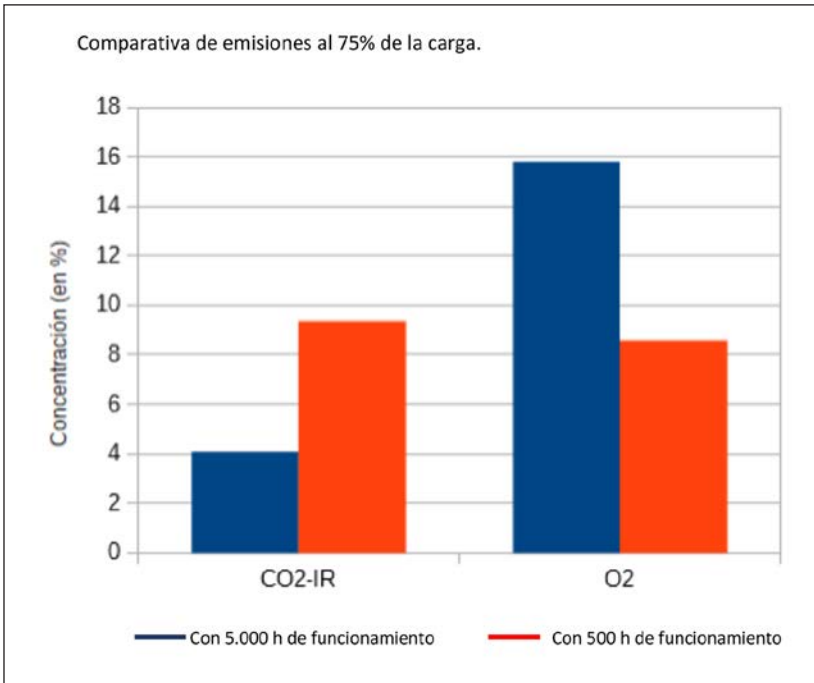


Figura 2.10. Comparativa de emisiones al 75% de la carga.

## Conclusiones

De este estudio actualmente en desarrollo podremos demostrar cómo el estado funcional de los motores marinos de alta potencia influye directamente sobre las emisiones emitidas de contaminantes tan perjudiciales como el  $\text{NO}_x$ , CO y partículas.

Gracias a este estudio, se podrá desarrollar un modelo óptimo que defina la relación existente entre el estado funcional del motor y las emisiones de CO,  $\text{NO}_x$  y PM (a través de la medida de SO<sub>x</sub>), basado en el análisis de pruebas que se desarrollarán a bordo de los barcos y teniendo en cuenta que pruebas anteriores realizadas tanto en banco de pruebas como en motores de velocidad media ya instalados a bordo de buques pusieron de manifiesto la influencia que el estado funcional del turbocompresor, la temperatura del aire de admisión del cilindro, la sincronización de la inyección, el estado funcional de toberas e inyectores, etc., ejerce sobre la producción de esos contaminantes.



No se trata, por tanto, exclusivamente de definir la relación existente entre la emisión de contaminantes y el estado funcional del motor, sino de definir un modelo óptimo de operación que minimice las emisiones, basado en los resultados obtenidos en pruebas realizadas en otros motores de mediana potencia que ya han sido publicados y cuyos autores son los directores de esta tesis.

## Referencias

- [1] Fact Sheet EPA-420-F-09-075, December 2009. United States Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality.
- [2] Cengiz, D. y Durmuşoğlu, Y. (2008). *Science of the Total Environment*, 390 (1), 255-261.
- [3] Richard, A., Broome, A., Martin, E., Cope, B., Goldsworthy, B., Goldsworthy, L., Emmerson, K., Jegasothy, E. y Morgand, G. (2016). *Environment International*, 87, 85-93.
- [4] Winebrake, J. J., Corbet, J. J., Green, E. H., Lauer, A. y Eyring, V. (2009). *Environ. Sci. Technol.*, 43 (13), 4776-4782.
- [5] De Meyera, P., Maesa, F. y Volckaertb, A. (2008). Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaports *Atmospheric Environment*, 42, 196-206.
- [6] Schrooten, L., De Vlieger, I., Panis, L., Styns, K. y Torfs, R. (2008). Inventory and forecasting of maritime emissions in the Belgian sea territory, an activity-based emission model. *Atmospheric Environment*, 42, 667-676.
- [7] Eyring, V., Isaksen, I., Berntsen, T., Collins, W. J., Corbett, J. J., Endresen, O., Grainger, R. G., Moldanova, J., Schlager, H., y Stevenson, D.S. (2009). Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmospheric Environment*, 44, 1-37.
- [8] Vutukuru, S. y Dabdub, D. (2008). Modeling the effects of ship emissions on coastal air quality: a case study of Southern California. *Atmospheric Environment*, 42, 3751-3764.
- [9] Dore, A. J., Vieno, M., Tang, Y. S., Dragosits, U., Dosio, A., Weston, K. J. y Sutton, M. A. (2007). Modelling the atmospheric transport and deposition of sulphur and nitrogen over the United Kingdom and assessment of influence of SO<sub>2</sub> emissions from international shipping. *Atmospheric Environment*, 41, 2355-2367.

- [10] Sarvi, A., Fogelholm, C. y Zevenhoven, R. (2007). Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 2. Influence of fuel type and operating mode. *Fuel Processing Technology*.
- [11] Fridell, E., Steen, E. y Peterson, K. (2008). Primary particles in ship emissions. *Atmospheric Environment*, 42, 1160-1168.
- [12] Report of the Marine Environment Protection Committee on its Fifty-eighth session: Annexes 13 and 14 to the report of the Marine Environment Protection Committee on its fifty-eighth session (MEPC 58/23).
- [13] Paro, D. (2001). Development of the Sustainable Engine. *CIMAC Congress 2001*, Hamburg.
- [14] John B. Heywood (2018). *Internal Combustion Engines*. McGraw Hill.
- [15] European Commission Directorate General Environment Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market based Instruments.
- [16] Krishnamurthy, M., Carder, D. K., Thompson, G. y Gautam, M. (2007). Cost of lower NOx emissions: Increased CO2 emissions from heavy-duty diesel engines. *Atmospheric Environment*, 41, 666-675.
- [17] EPA. History of Reducing Air Pollution from Transportation in the United States.

# Análisis de la actividad muscular en hipoterapia

## *Analysis of muscular activity in hippotherapy*

M.<sup>a</sup> DOLORES APOLO ARENAS

Facultad de Medicina, Universidad de Extremadura, Badajoz  
mdapolo@unex.es

NEREA CÁCERES PÍRIZ

ALEJANDRO CAÑA PINO

Facultad de Medicina, Universidad de Extremadura, Badajoz

JOSÉ A. PARRACA

Escuela de Salud y Desarrollo Humano,  
Universidad de Évora, Évora (Portugal)

### Resumen

La hipoterapia es un método terapéutico de base neurofisiológica que utiliza el paso del caballo para la adquisición y desarrollo de las funciones psicomotoras, siendo de especial interés para el proceso de rehabilitación de personas con diversidad funcional. Por otro lado, se precisan instrumentos de valoración que permitan un análisis objetivo y cuantitativo de la evolución y a la vez orienten la intervención terapéutica. La EMG de superficie es ampliamente utilizada en diferentes ámbitos con la finalidad de una evaluación neuromuscular no invasiva.

Objetivo: Analizar el interés de la EMG para orientar la intervención terapéutica analizando la activación muscular en diferentes actividades realizadas sobre el caballo.

Metodología: Estudio de caso de una niña (5 años) con espina bífida que realiza un programa de hipoterapia (una sesión/semana, 45 minutos). Valoración de la musculatura abdominal y multifidos mediante EMG (Shimmer® mDurance®) en diferentes ejercicios sobre el caballo: paradas y arranque, brazos arriba, brazos en avión y brazos hacia adelante, respiración y ejercicio de levantar-

se desde tumbado en la grupa. Se analizan las diferencias en la activación de la musculatura en cuanto a simetría y entre las cadenas musculares anterior y posterior.

**Resultados:** Se observa que la activación muscular de los multifidos y abdominales es variable según los ejercicios realizados, lo que permite analizar la simetría y si la activación es la esperada.

**Conclusiones:** La EMG puede ser una herramienta de utilidad en hipoterapia para determinar la actividad muscular, pero es necesario un análisis del comportamiento de los datos e indicadores adaptados a la particularidad de la hipoterapia. Así, es de interés complementarlo con otras metodologías de valoración como la videografía o acelerometría.

**Palabras clave:** hipoterapia, EMG, discapacidad.

### **Abstract**

Hypotherapy is a therapeutic method, neurophysiologically based, that uses the horse's gait for the acquisition and development of psychomotor functions, being of special interest for the rehabilitation process of people with functional diversity. On the other hand, it requires assessment instruments that allow an objective and quantitative analysis of the evolution and at the same time guide the therapeutic intervention. Surface EMG is widely used in different areas for non-invasive neuromuscular assessment.

**Objective:** To analyze the interest of EMG to guide therapeutic intervention by analyzing muscle activation in different activities performed on the horse.

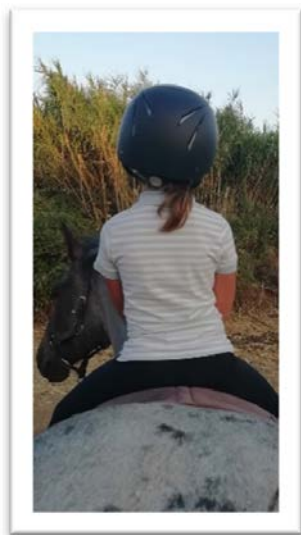
**Methodology:** Case study of a girl (5 years old) with spina bifida who underwent a hypotherapy program (one session/week, 45 minutes). Assessment of abdominal muscles and multiples by EMG (Shimmer® mDurance®) in different exercises on the horse: stop and start, arms up, arms in plane and arms forward, breathing and standing exercise from lying on the rump. The differences in the activation of the musculature are analysed in terms of symmetry and between the anterior and posterior muscle chains.

**Results:** It is observed that the muscular activation of the multiphysics and abdominals is variable according to the exercises performed, allowing to analyze the symmetry and if the activation is as expected.

**Conclusions:** EMG can be a useful tool in hypotherapy to determine muscle activity, but an analysis of the data and indicators adapted to the particularity of hypotherapy is needed. Thus, it is of interest to complement it with other assessment methodologies such as videography or accelerometry.

**Keywords:** hippotherapy, EMG, disability.

## Introducción



Una gran mayoría de las personas con diversidad funcional/ discapacidad requieren intervenciones terapéuticas a lo largo de su vida. Por eso es necesario buscar recursos terapéuticos que, además de su efectividad, sean motivantes y aborden a la persona desde un punto de vista holístico. La hipoterapia es un método terapéutico, de base neurofisiológica, que utiliza el paso del caballo para la adquisición y el desarrollo de las funciones psicomotoras. Puede cumplir los requisitos de motivación, entorno diferente, abordaje global de la persona, lo que permite un bienestar bajo un entorno de diversión. Ya Hipócrates hacía mención al «saludable ritmo del caballo».

## Justificación y objetivo

La literatura científica avala que la hipoterapia aporta beneficios en cuanto a control postural, equilibrio, función motora, simetría muscular, marcha, factores psicológicos y psicosociales y en el ámbito emocional, así como en personas con parálisis cerebral, esclerosis múltiple, lesiones medulares, síndrome de Down, autismo, etc.

Los terapeutas que en el día a día realizan sesiones de hipoterapia realmente observan cualitativamente cuáles son las mejoras, los avances y la adquisición de nuevas capacidades, hechos en muchos de los casos refendados por las familias. Sin embargo, se precisa complementar estas valoraciones cualitativas con valoraciones cuantitativas que, además de ser de interés para la investigación, aporten datos a los terapeutas para orientar de manera más personalizada las sesiones y tener un referente de la activación real que se está produciendo, ya que en muchos casos los usuarios no pueden colaborar voluntariamente.

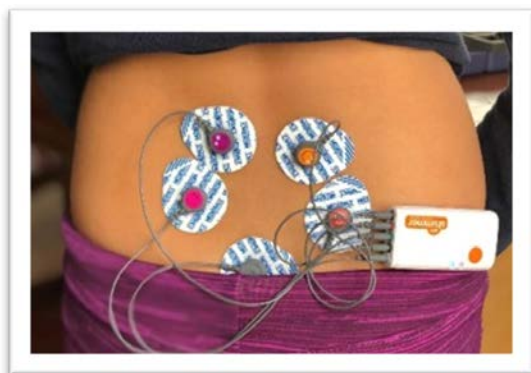
Por ello consideramos de interés la utilización de la electromiografía de superficie (EMG) como un instrumento de utilidad para cuantificar la actividad muscular. Además, se trata de una metodología versátil, no invasiva, portátil, de fácil manejo y que no requiere grandes infraestructuras, pudiendo ser utilizada en la pista y en tiempo real.

Estos argumentos y la necesidad han motivado este trabajo como experiencia inicial en un caso. Establecemos como objetivo: Analizar el interés de la EMG para orientar la intervención terapéutica en hipoterapia de un caso de espina bífida.

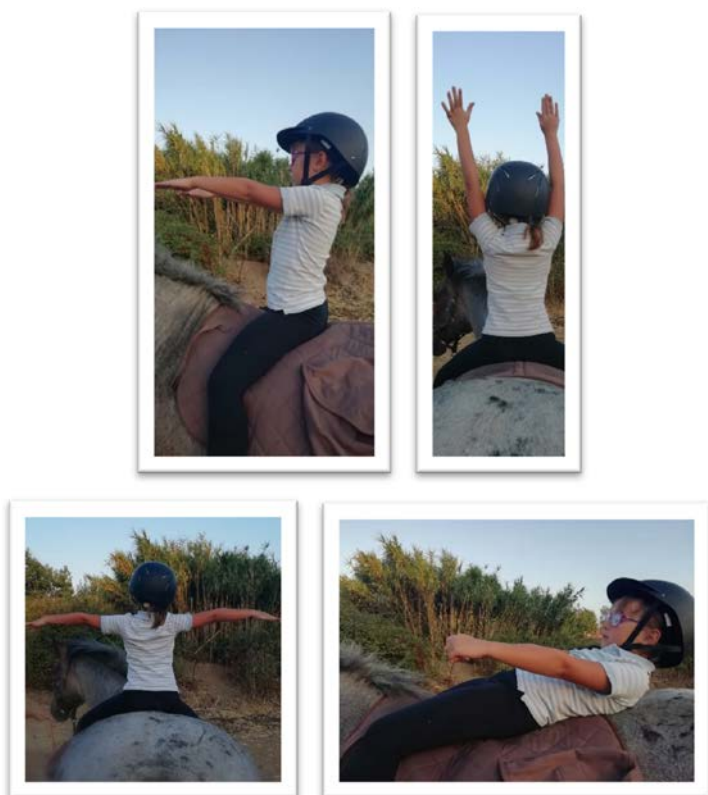
## Metodología

Diseño: Estudio de caso de una niña (5 años) con espina bífida (D11-D12) que realiza una sesión de hipoterapia (45 minutos) semanalmente.

Procedimiento: Valoración de la musculatura abdominal (recto anterior) y multifidos mediante EMG de superficie (Shimmer®, mDurance Pro®) siguiendo el protocolo SENIAM (fiura 3.1). Las mediciones de la actividad muscular se realizaron durante 10 segundos en las siguientes actividades: brazos arriba, brazos delante, brazos en avión, levantarse desde tumbado en la grupa (trabajo de abdominales) y respiración. (figura 3.2). El indicador utilizado fue la RMS. La duración del estudio fue de cuatro meses.



**Figura 3.1.** Colocación de electrodos en la cadena posterior (multífidos).



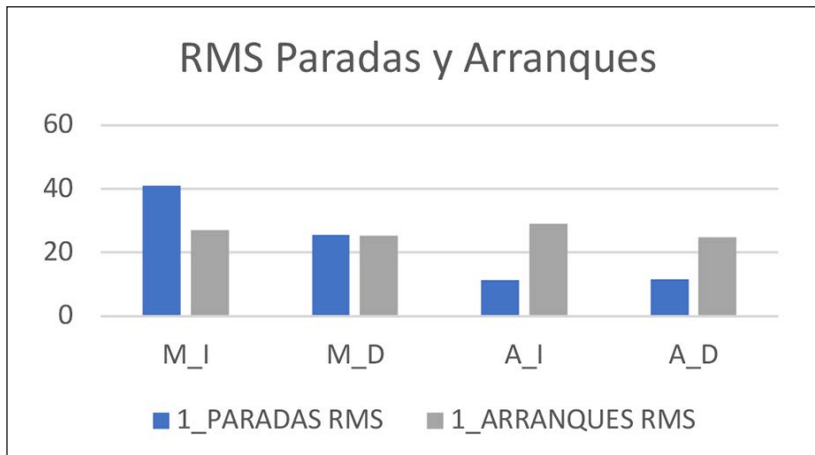
**Figura 3.2.** Ejercicios sobre el caballo: a) brazos delante, b) brazos arriba, c) brazos en avión, d) levantarse desde la posición de tumbado en la grupa.

## Resultados

A continuación se exponen los gráficos más significativos resultantes del análisis de los datos en cuanto a la actividad muscular en la realización de las diferentes actividades.

### Análisis de las paradas y arranques

Según observamos en la figura 3.3, se pone de manifiesto que la activación de la musculatura posterior difiere de la anterior según el ejercicio sea una parada, en cuyo caso hay una mayor activación de multifídeos, ya que, debido a la desaceleración, el tronco tiende a desequilibrarse hacia delante y esta musculatura provoca un enderezamiento posterior. Lo contrario ocurre en los arranques, donde hay una mayor activación de abdominales, ya que, debido a la aceleración, el tronco se desequilibra hacia atrás, y provoca en la musculatura abdominal un enderezamiento anterior. De esta manera se nos permite comprobar que el ejercicio se está realizando correctamente y existe activación y reacciones de enderezamiento y equilibrio antero-posteriores.



**Figura 3.3.** Paradas y arranques.

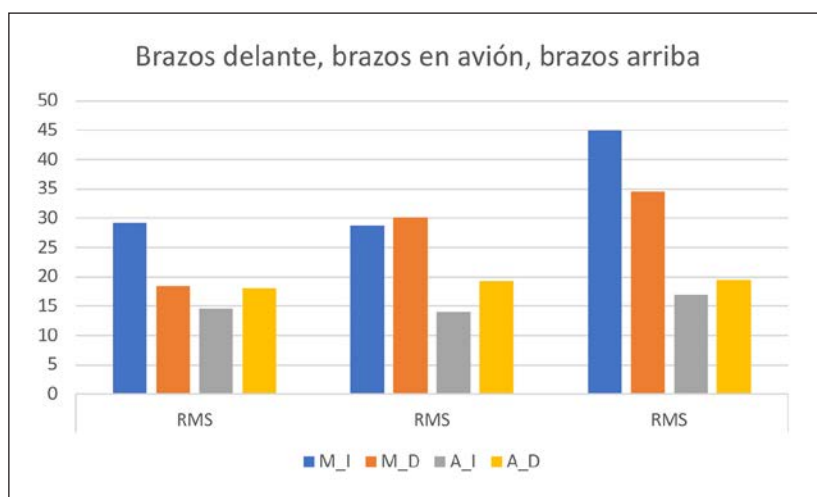
M\_I: Multifido izquierdo. M\_D: Multifido derecho. A\_I: Abdominal izquierdo. A\_D: Abdominal derecho.



## Análisis de ejercicios con los brazos

Según se puede observar en la figura 3.4, todos los ejercicios implican una mayor activación de la cadena posterior, siendo más intensa cuando se realiza el ejercicio de brazos arriba. Sin embargo, en el ejercicio de brazos en cruz, la activación de los multifidos es más simétrica.

Estos resultados son de interés para orientar a los terapeutas cuales son los efectos de cada ejercicio y utilizarlos según los objetivos establecidos. En este caso, el ejercicio de brazos en avión contribuye a una mejor simetría.



**Figura 3.4.** Brazos delante, brazos en avión, brazos arriba.

M\_I: Multifido izquierdo. M\_D: Multifido derecho. A\_I: Abdominal izquierdo. A\_D: Abdominal derecho.

## Análisis de la activación en la respiración y el ejercicio de levantarse desde tumbado de la grupa

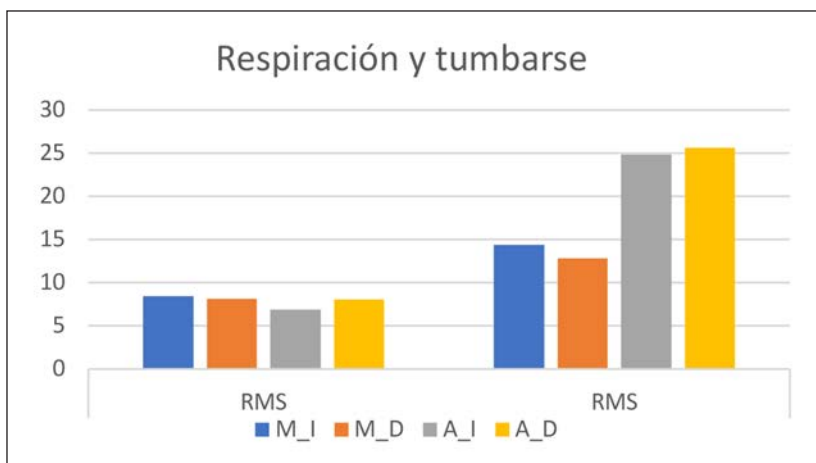
El objetivo de ambos ejercicios es la activación de la musculatura abdominal, de interés en este caso para ayudar a la estabilización pélvica y evitar la hiperlordosis.

Como se observa en la figura 3.5, al realizar la respiración, la activación muscular es similar en toda la musculatura, siendo ligeramente mayor en el multifido izquierdo y abdominal dere-

cho. Estos resultados nos muestran que es un ejercicio de utilidad para una activación simétrica entre ambas cadenas.

En cambio, al tumbarse y levantarse hay un mayor trabajo de abdominales, de forma que nos muestra que el ejercicio está bien realizado, ya que la contracción de esta musculatura debe activarse para incorporarse. Además en el caso de estudio, permite observar que aunque existe una lesión medular hay una contracción efectiva de los abdominales.

Igualmente observamos que este último ejercicio, levantarse desde tumbado en la grupa, es de mayor intensidad que la respiración consciente con espiración voluntaria mediante contracción abdominal.



**Figura 3.5.** Respiración y tumbarse. M\_I: multifido izquierdo. M\_D: multifido derecho. A\_I: abdominal izquierdo. A\_D: abdominal derecho.

## Conclusiones

El análisis en este estudio de caso nos permite obtener las siguientes conclusiones:

- La EMG puede facilitar la orientación en la intervención terapéutica, especialmente en la realización de diferentes actividades, ya que permite comprobar si hay una activación muscular correcta y si el ejercicio se está ejecutando adecuadamente.

- La EMG puede ser una herramienta de utilidad en hipoterapia para determinar la actividad muscular, pero se precisa un análisis del comportamiento de los datos e indicadores adaptados a la particularidad de la hipoterapia, siendo necesaria una protocolización. Así, es de interés complementarlo con otras metodologías de valoración como la videografía o la acelerometría.

## Referencias

- Álvarez Fiallo, R., Santos Anzorandia, C., Medina Herrera, E., Gutiérrez Sánchez, Á. y Jiménez Paneque, R. (2006). Estudio electromiográfico convencional y cuantitativo de enfermedades neuromusculares, análisis comparativo de sus resultados. *Rev Cuba Med Mil.*, 35 (4), 0-0.
- Benda, W., McGibbon, N. H. y Grant, K. L. (2003). Improvements in muscle symmetry in children with cerebral palsy after equine-assisted therapy (hippotherapy). *J Altern Complement Med N Y N*, 9 (6), 817-825.
- Gomes, T. T., Hassunuma, R. M. y Da Silva, L. M. (2014). Hippotherapy as a therapeutic resource in myelomeningocele: a case study. *Rev Neurocienc.*, 22 (3), 458-463.
- Lakomi, A. A., Józefowicz, K., Raniszewska, A. *et al.* (2017). The impact of hippotherapy on the quality of trunk stabilisation, evaluated by EMG biofeedback, in children with infantile cerebral palsy. *Annals of Med.*, 24 (1), 9-12.
- Mendizábal, P. (2020). Intervenciones fisioterápicas mediante hipoterapia en el tratamiento de la parálisis cerebral. Revisión bibliográfica. *Rehabilitación*, 54 (2), 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.rh.2019.11.003>
- McGibbon, N. H., Benda, W., Duncan, B. R. y Silkwood-Sherer, D. (2009). Immediate and long-term effects of hippotherapy on symmetry of adductor muscle activity and functional ability in children with spastic cerebral palsy. *Arch Phys Med Rehabil.*, 90 (6), 966-974.
- Ribeiro, M. F., Espindula, A. P., Lage, J. B., Bevilacqua Júnior, D. E., Diniz, L. H., De Mello, E. C. *et al.* (2019). Analysis of the electromyographic activity of lower limb and motor function in hippotherapy practitioners with cerebral palsy. *J Bodyw Mov Ther.*, 23 (1), 39-47.
- Ribeiro, M. F., Espindula, A. P., Ferreira, A. A. *et al.* (2015). Electromyographic evaluation of lower limbs in individuals with Down síndrome in hippotherapy. *Physiotherapy*, 101 (1), 1279-1280.
- SENIAM. <http://seniam.org/>



# Influencia del contenido de azufre en el combustible utilizado en el transporte marítimo sobre la calidad del aire

*Influence of Sulphur content on the fuel used in maritime transportation on air quality*

FÁTIMA CALDERAY CAYETANO  
Escuela Superior de Ingeniería, Puerto Real, Cádiz  
fatima.calderay@uca.es.

JUAN MORENO GUTIÉRREZ  
YOLANDA AMADO SÁNCHEZ  
RUBÉN RODRÍGUEZ MORENO  
ANTONIO RAMÍREZ SÁNCHEZ  
EMILIO PÁJARO VELÁZQUEZ  
VANESA DURÁN GRADOS  
Escuela de Ingenierías Marina, Náutica  
y Radioelectrónica, Universidad de Cádiz

## Resumen

El transporte marítimo utiliza mayoritariamente combustible que contiene azufre, por lo que durante el proceso de combustión se generan óxidos de azufre, los cuales son expulsados por la chimenea de los buques a la atmósfera, por lo que producen efectos serios sobre la salud y afectan también a los ecosistemas acuáticos.

La Organización Marítima Internacional (OMI) establece unas regulaciones medioambientales para reducir las emisiones contaminantes procedentes de los buques, siendo el contenido de azufre actual en 2020 del 0,5% m/m. Lo que conlleva a una disminución de los SO<sub>x</sub> emitidos a la atmósfera que mejoren la calidad del aire que respiramos.

Para cuantificar las emisiones producidas por el transporte marítimo se necesitan crear inventarios de emisiones, para los cuales existen distintas metodolo-

gías, y en función de ellos se elaborará el modelo de calidad del aire teniendo en cuenta todas las condiciones meteorológicas que se den en la zona de estudio.

**Palabras clave:** calidad del aire, salud, azufre, emisiones, óxidos de azufre, transporte marítimo.

### **Abstract**

Maritime transport mainly uses fuel containing sulfur, so that during the combustion process sulfur oxides are generated, which are expelled through the ships' chimneys into the atmosphere, producing serious effects on health and affecting aquatic ecosystems.

The International Maritime Organization (OMI) establishes environmental regulations to reduce pollutant emissions from ships, with the current sulfur content in 2020 being 0,5% m/m. This leads to a reduction of SO<sub>x</sub> emitted into the atmosphere, improving the air quality of the air we breathe.

In order to quantify the emissions produced by maritime transport, it is necessary to create emission inventories, for which there are different methodologies, and based on them, the air quality model will be developed taking into account all the meteorological conditions in the study area.

**Keywords:** air quality, health, sulfur, emissions, sulfur oxides, maritime transport.

## **Introducción**

La actividad marítima ha aumentado considerablemente a lo largo del siglo pasado y en la actualidad no solo contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que, además, causa enfermedades cardiovasculares y respiratorias especialmente en áreas con gran densidad de población. Para evitar el crecimiento de estas emisiones, la Organización Marítima Internacional (OMI) ha elaborado normas más restrictivas para disminuir las emisiones producidas por los buques y poder mejorar así la calidad del aire.

La Directiva 1999/32/CE (modificada por la Directiva 2005/33/CE) regula el contenido de azufre de los combustibles utilizados para el transporte marítimo e incorpora a la legislación de la UE determinadas reglas internacionales adoptadas en el marco de la OMI. Concretamente, la Directiva en su forma actual incorpora reglas más estrictas sobre el contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo en zonas que requieren

una protección ambiental especial, denominadas zonas de control de las emisiones contaminantes de azufre (SECA).

Las regulaciones medioambientales relacionadas con el transporte marítimo (OMI, MARPOL Anexo VI) implican reducir las emisiones contaminantes procedentes de los buques a los siguientes porcentajes: emisiones contaminantes de SO<sub>2</sub> procedentes de mares europeos se reducirían en un 82 % en 2020 con respecto a 2005. Sin embargo, debido al incremento que se está generando en el volumen de mercancías transportadas por buque, se prevé que las emisiones contaminantes aumenten a partir del año 2020, aumento que se vería contrarrestado en caso de tomarse medidas de reducción y mantener las mismas cotas comprendidas entre el 12 y el 13 % del año 2020.

La figura 4.1 muestra la regulación para el contenido de azufre en los combustibles por zona y año, donde las restricciones en la cantidad de azufre en el combustible van siendo progresivamente más pequeñas, y se diferencian los límites globales de las zonas de control de emisiones (SECA).

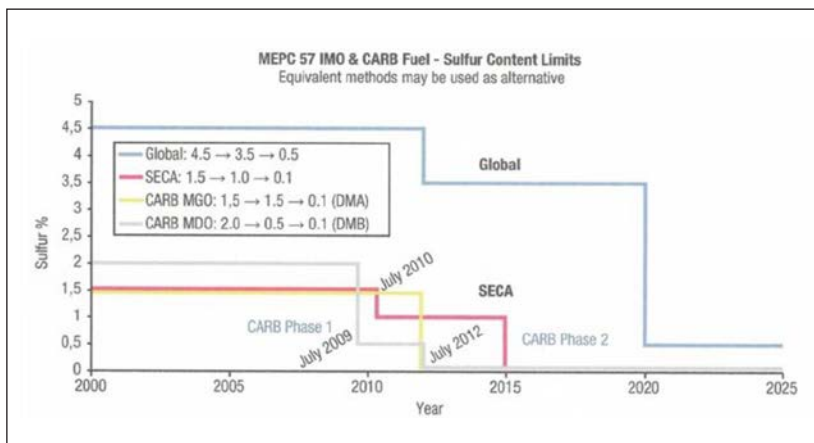


Figura 4.1. Regulación del contenido de azufre. Fuente: OMI.

La aplicación de la legislación SECA en el Mar Báltico y el Mar del Norte (incluido el Canal de la Mancha) podría ayudar a reducir las emisiones contaminantes en 2030 en 23 kt de SO<sub>2</sub>. Para el caso de las zonas económicas exclusivas (200 millas náuticas), estas aplicaciones legislativas conllevarían una caída en las emisiones contaminantes a un total de 160 kt de SO<sub>2</sub> para ese mis-

mo año. En cuanto a las emisiones contaminantes de PM se reducirían en un 66 % [2].

Respecto al control del contenido de azufre en el combustible, como está reflejado en la tabla 4.1, habría que tener en cuenta la Regla 14.4 de MARPOL Anexo VI, sobre la reducción para los límites del contenido de azufre en los combustibles para los buques que operan dentro de un área de control de emisiones contaminantes de azufre (SECA) para reducir aún más las emisiones contaminantes de óxidos de azufre (SOx). La Directiva 1999/32/EC entró en vigor el 1 de enero de 2015 y en su versión del 1 de junio de 2015 establece que, a partir de esa fecha, los buques que operan dentro de cualquiera de las cuatro zonas SECA existente, es decir el Mar Báltico, el Mar del Norte (incluido el Canal de la Mancha), América del Norte y las zonas de Estados Unidos y Mar Caribe, deberán utilizar combustible con un contenido de azufre menor a 0,10% m/m (en peso).

La tabla 4.1 muestra los límites de contenido de azufre en el combustible según esta normativa.

**Tabla 4.1.** Enmiendas y resoluciones según Anexo VI MARPOL

Denominación	Entrada en vigor	Descripción
MARPOL Anexo VI. 1997	19 mayo 2005	Establece los límites de emisiones contaminantes procedentes del transporte marítimo de SOx y NOx. Límite de 4,5% en el contenido de azufre en el combustible. Consideraciones a tener en cuenta en las zonas SECA: El combustible usado a bordo no debe exceder de 1,5% m/m.
Resolución MEPC 82(43). 1999	01 julio 2010	Reducción del límite de contenido de azufre en el combustible de 4,5% a 3,5%. Reducción en los límites de contenido de azufre de 1,5% a 1%, teniendo prevista su reducción a 0,1% en enero de 2015.
Resolución MEPC 53/24. 2000	Noviembre 2006	Se declara el Mar del Norte como zona SECA.
Resolución MEPC176(58). 2008	1 enero 2012	4,50% m/m
	Desde 1 de enero 2012	3,50% m/m
	Desde 1 de enero 2020	0,50% m/m



Requerimientos zona ECA. Límites de azufre en el combustible	Antes de 1 julio de 2010	1,50 % m/m
	A partir de 1 de julio 2010	1 % m/m
	A partir de 1 de julio 2015	0,1 % m/m

**Tabla 4.2.** Límites en el contenido de azufre en combustible según Anexo VI del MARPOL, Regla 14.4

	Fuera de zonas SECA	Dentro de zonas SECA
Buques en puertos (incluidos fondeados)	0,10% No aplicable si está menos de 2 horas en puerto o si se va a tomar corriente de tierra.	
Buques de pasajeros con servicio regular entre puertos de la Unión Europea	Hasta 01-01-2020: 1,5 % Desde 01-01-2020: 0,5 %	Hasta 31-12-2014: 1,00 % Desde 01-01-2015: 0,1 %
Otros casos de buques	Desde 18-06-2014: 3,5 % Desde 01-01-2020: 0,5 %	Hasta 31-12-2014: 1,00 % Desde 01-01-2015: 0,1 %

El impacto ambiental producido por el transporte marítimo internacional es alto, por lo que si no se hace efectivo el cumplimiento de dichas normativas, se prevé que los impactos negativos persistirían también en el futuro [1].

Si se aplica la normativa prevista [2], se obtendrá una drástica disminución de los  $SO_x$  del 80 %. Esto sería debido a la reducción del contenido de azufre en el combustible a un 0,1 % m/m en las zonas SECA y 0,5 % m/m en el resto de las zonas. Las disminuciones más altas en  $SO_x$  se producen en las zonas SECA (Mar Báltico y Mar del Norte más el Canal de la Mancha).

Después del 2020, las emisiones contaminantes sufren un ligero aumento, debido a un mayor consumo de combustible causado por un aumento de la actividad. En 2030 serán un 13 % más alto que en 2020. El aumento (alrededor del 19 %) de  $SO_x$  se produce por el aumento del consumo de combustible. Hasta el año 2050, las emisiones contaminantes seguirán aumentando hasta aproximadamente 40-50 % más que en 2020.

## Metodología

El Grupo de investigación RNM920 de Eficiencia Energética en el Transporte Marítimo de la Universidad de Cádiz, del cual son

miembros los presentes autores, trabaja en varios proyectos para el cálculo de las emisiones procedentes del transporte marítimo y su influencia en la calidad del aire.

Consideraremos como zona de estudio la correspondiente al Estrecho de Gibraltar (figura 4.2), donde se produce un importante tráfico marítimo tanto nacional como internacional.

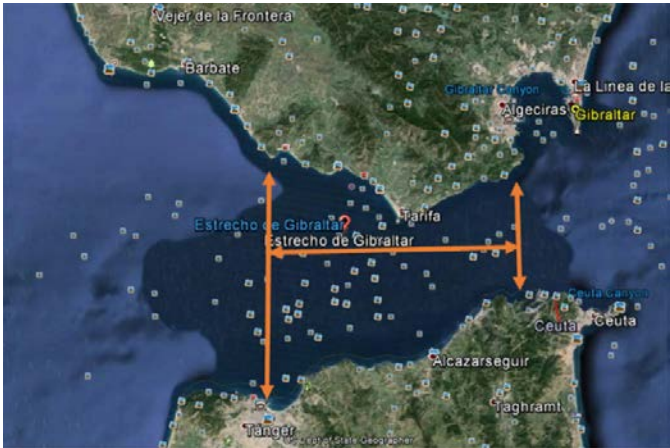


Figura 4.2. Estrecho de Gibraltar.

Una vez definida la zona de estudio, el primer paso necesario es tener un inventario de emisiones procedentes del transporte marítimo, que será la base para poder ver cómo afectan dichas emisiones a la calidad del aire. Para ello tendremos que calcular los consumos de combustibles y posteriormente calcular las emisiones producidas, por lo que estas emisiones dependerán del contenido de azufre que tenga el combustible.

Actualmente, no existe definida una metodología de cálculo común, por lo que podemos apreciar en los resultados diferencias importantes en función del modelo de cálculo utilizado [3]. Nosotros consideramos todas aquellas condiciones que afectan en la navegación entre ellas las condiciones meteorológicas y las condiciones de ensuciamiento del casco y la hélice, ya que las emisiones de  $SO_x$  están influenciadas por dichas condiciones de navegación. Concretamente, utilizamos el reciente modelo denominado SEMEN [4] (*ship's energy efficiency model*), que parte del modelo OMI, pero considera todas las adaptaciones mencionadas, las condiciones meteorológicas, el estado de mantenimien-

to del caso y la hélice, y el rendimiento del sistema de propulsión. Todas estas variables influyen directamente en la potencia instantánea suministrada por los motores principales en tiempo real, en el consumo de combustible y, por consiguiente, en las emisiones emitidas a la atmósfera.

Una vez obtenidas las emisiones que se producen a la atmósfera, hay que desarrollar un modelo de calidad que permita simular la contribución de las emisiones del tráfico marítimo y portuario a los niveles de inmisión de contaminantes, siendo necesario conocer las características de las condiciones meteorológicas más representativas de la zona. Para aplicar el modelo de dispersión CALPUFF se considera como fuente de emisión las chimeneas de los buques, siendo un foco de emisión en movimiento, ya que se desplaza por sus diferentes rutas de navegación. Además, se considera que se emiten en una cantidad uniforme.

Este modelo nos proporcionará los resultados de concentración de cada contaminante en la atmósfera cuyo análisis determinará la concentración de cada contaminante expresada en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en las mallas en estudio, que, comparado con los límites permitidos, nos puede dar un índice de la posible incidencia negativa que pueda tener sobre la salud humana.

Para finalizar, hay que analizar los resultados del modelo comparando las contribuciones resultantes con los valores límites para los contaminantes establecidos en Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece como valores recomendados para los  $\text{SO}_2$  una cantidad de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  medida en 24 horas.

**Tabla 4.3.** Emisiones de óxido de azufre (t)

Condiciones de navegación	$\text{SO}_2$
Mejores condiciones (buena mar y buen estado del buque)	3688.34
Condiciones medias (mala mar y buen estado del buque)	3842.020833
Condiciones medias (buena mar y casco del buque rugoso)	4098.155556
Peores condiciones (mala mar y casco muy rugoso)	5122.694444

## Resultados

En la tabla 4.3 vemos cómo influyen las condiciones meteorológicas y el estado del caso y la hélice del buque en las emisiones producidas, considerando el contenido de azufre constante en el combustible. Se muestran los resultados obtenidos durante el 2017 en la zona de estudio, teniendo en cuenta que, según se consideren unas condiciones favorables o desfavorables de navegación, las emisiones de  $\text{SO}_x$  serán diferentes, por lo que se aprecia la importancia del modelo de cálculo utilizado para la elaboración de los inventarios de emisiones producidas por el transporte marítimo.

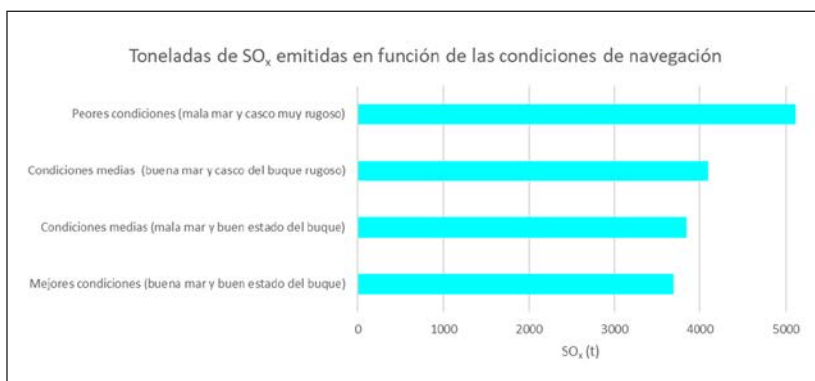


Figura 4.3.  $\text{SO}_x$  (t) emitidas considerando las variaciones de condiciones posibles.

## Conclusiones

En este trabajo no se reflejan valores obtenidos de una investigación actualizada para poder compararlos con los que se tienen actualmente calculados en 2017 y ver cómo disminuyen las emisiones de óxidos de azufre tras la aplicación de la nueva normativa que entró en vigor en 2020. Esta normativa supone una reducción del contenido de azufre en el combustible que establece un máximo de 0,5 % m/m; sin embargo, existen estudios de cómo la disminución del contenido de azufre en 0,1 % m/m establecido en las zonas de control de emisiones (zonas ECAS) producen importantes disminuciones en las emisiones de  $\text{SO}_x$ , mejorando así la calidad de aire de aquellas zonas catalogadas como SECAs.

Para calcular las emisiones de  $\text{SO}_x$  es importante que se consideren todas las condiciones que influyen en el consumo de energía que emplea un buque en navegación, considerando tanto las condiciones meteorológicas que pueden ir cambiando durante una misma ruta de navegación como las propias condiciones en las que se encuentre el buque, ya que, a medida que el casco del buque sufre el ensuciamiento por incrustaciones procedentes del ecosistema marino, debido a encontrarse en contacto con el agua, la resistencia que el buque opone al movimiento es mayor, por lo que la energía que necesite el buque será mayor, lo que implicará un mayor consumo de combustible, que se traducirá en más emisiones a la atmósfera que se dispersarán transportándose hasta zonas pobladas produciendo efectos perjudiciales en la salud y en el entorno.

Se sabe que si se elimina el azufre del combustible, también se eliminan los  $\text{SO}_x$ ; pero, además, eliminar el azufre del combustible implica disminuir las emisiones de material particulado, que tan perjudiciales son para la salud.

## Agradecimientos

This project has received funding from the European Union's Erasmus+ programme under grant agreement 2018-3387/001-001 (Project number 601186).



The European Commission support for the production of this publication does not constitute endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

## Referencias

- [1] Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V. y Lauer, A. (2007). *Environ. Sci. Technol.*, 41 (24), 8512-8518. DOI: 10.1021/es071686z.
- [2] Campling, P., Liliane, J., Vanherle, K., Cofala, J., Heyes, C. y Sander, R. (2013). *Specific evaluation of emissions from shipping including assessment for the establishment of possible new emission control areas in European Seas*. Vision on Technology (VITO).
- [3] Moreno-Gutiérrez, J., Calderay, F., Saborido, N., Boile, M., Valero, R. R. y Durán-Grados, V. (2015). Methodologies for estimating shipping emissions and energy consumption: a comparative analysis of current methods. *Energy*, 86, 603-616.
- [4] Moreno-Gutiérrez, J. y Durán-Grados, V. (2020). Calculating ships' real emissions of pollutants and greenhouse gases: towards zero uncertainties. *Science of The Total Environment*, 141471.

# Investigación en desarrollo del potencial de aislamiento térmico de una envolvente que integra materiales tradicionales y ecológicos acompañados de sistemas inteligentes básicos para edificaciones en la ciudad de Quito

*Investigation on the enhancement of the thermal insulation potential of a building envelope integrating both traditional and ecological, using basic intelligent systems for building at Quito city*

LUIS FREIRE AMORES  
Universidad Tecnológica Equinoccial  
luis.freire@ute.edu.ec

## Resumen

La presente investigación está enfocada en evidenciar el potencial de aislamiento térmico que sugiere una envolvente desarrollada con materiales tradicionales y ecológicos generados a partir de residuos reciclables y biomasa procedentes de la ciudad de Quito, acompañados de un sistema de tecnologías emergentes que hace uso de las TIC para una mayor eficiencia de las estrategias tradicionales, todo esto como parte de un avance del trabajo de tesis doctoral desarrollado para el Programa de Doctorado de la Universidad de Extremadura, España.

Las TIC (tecnologías de la información y comunicación; ICT en inglés) a las que se hace referencia son microcontroladores y software de optimización (Arduino, Rhinoceros, Grasshopper), conectados a un prototipo de envolvente diseñado con módulos que respondan mediante sensores y actuadores (*wireless sensor and actuator networks*), a esos cambios climáticos drásticos e impredecibles que sugiere el medio exterior/interior (temperatura, humedad y calidad del aire) en tiempo real de una manera intuitiva y no invasiva.

Estos módulos que se mencionan estarán cuidadosamente diseñados junto a sus componentes para garantizar la eficacia y eficiencia del sistema, a la vez que su materialidad responde al problema del mal manejo de los desechos poco degradables procedentes de la ciudad, apoyados en biomasa procedente del lugar.

En resumen, el sistema activo avanzado de envolvente propuesto busca aportar al confort térmico del edificio, mientras que sus componentes apuestan por el rescate de materiales tradicionales y ecológicos, así como por la valoración de saberes y sistemas constructivos ancestrales que reafirmen una identidad cultural contemporánea. Identidad expresada en una arquitectura crítica, local, autónoma, enfocada a encontrar una relación más directa entre usuario y contexto, a la vez que persigue resultados prometedores en términos de eficiencia energética, morfología, legado cultural, confort térmico y salud de sus ocupantes.

**Palabras clave:** aislamiento térmico, eficiencia energética, recursos naturales, automatización en construcción, sensores y actuadores inalámbricos.

### **Abstract**

The present investigation aims to demonstrate the potential thermal isolation provided by an enveloping, which is created with traditional and eco-friendly materials, obtained from recycling residue and biomass from the city of Quito, and controlled by a system of emerging technology, which uses ICTs to obtain a greater efficiency than the traditional strategies; all of which is part of an ongoing doctoral dissertation within the PhD Program of the University of Extremadura, Spain.

The referred ICTs (Information and Communications Technologies) are micro controllers and optimization software such as Arduino, Rhinoceros, Grasshopper, connected to an enveloping prototype, designed with units that respond, through wireless sensors and actuator networks, to dramatic and unpredictable climate changes from the external / internal environment (temperature, humidity and air quality) in real time and with an intuitive and non-invasive approach.

The referred units will be carefully designed so that all their components guarantee the system's effectiveness and efficiency. In addition, their materiality involves part of a solution to the mishandling of scarcely degradable waste from Quito and biomass deriving from the city.

In summary, the advanced system of the proposed enveloping aims to support the thermal comfort of the building, while investing in its components, based on traditional and eco-friendly materials. At the same time, it highlights the value of local knowledge and ancient construction systems, which reaffirms the contemporary cultural identity. This identity is expressed in a critical, local,



autonomous and focused architecture to find a more direct relation between the user and the context, which at the same time searches for promising results in regards to energy efficiency, morphology, cultural legacy, thermal comfort and inhabitants health.

**Keywords:** thermal enveloping, energy efficiency, natural resources, automation in construction, wireless sensor and actuator networks.

## Introducción

La migración hacia las ciudades junto a su acelerado crecimiento poblacional son fenómenos globales que han provocado, entre otros problemas, un impacto medioambiental cada vez más alarmante [1]. La actividad humana genera grandes cantidades de basura; el plástico es el material que más preocupa por su distante tiempo de degradación y su casi nulo proceso de reutilización, por lo que consecuentemente va a parar a todos los océanos del planeta. Así lo afirma el documental *A Ocean Plastic* (Leeson, 2011), en el cual, entre varias estadísticas alarmantes, indica que 8 millones de toneladas de plástico son arrojadas a los océanos del mundo cada año [2].

Otro problema ligado a este proceso de urbanización es el mal entendido «progreso», que, en el caso de la construcción, tiende a la utilización de materiales y sistemas constructivos industrializados y deja de lado los materiales tradicionales, así como los sistemas de edificación popular y los saberes constructivos ancestrales. Esto, además de ocasionar la pérdida de identidad cultural de nuestras localidades, también acarrea problemas actuales ligados a las condiciones climáticas del lugar.

En este sentido, si bien es cierto que el hormigón ha demostrado mundialmente ser el material con mejores características en el campo de la construcción por su elevada resistencia a la compresión, la mayoría de las investigaciones encontradas en el estado del arte van encaminadas a revisar sus componentes para mejorar esta condición. Dentro de estas, el manejo de fibras no es la excepción; unas van encaminadas a mejorar sus características a tracción y otras tantas, a reemplazar los agregados pétreos que lo componen (Beraldo, 2011) [3]. Muy poco se ha explorado en el potencial de aislamiento térmico que pudiera aportararle a la envolvente del edificio la integración de biomasa [4] u otros

elementos residuales que se originan en las ciudades, como se comentó anteriormente, y que, además de contribuir a disminuir esta situación, le permitiría aportar interesantes variables sostenibles, culturales y morfológicas mientras responde de manera inmediata al confort del usuario [5, 6].

Sin dejar de lado el aspecto de una resistencia mínima requerida para su manipulación en obra [7], la presente investigación busca en su primera fase desarrollar un material que, basándose en el hormigón, recoja los antecedentes presentados previamente, lo más liviano posible, ecológico y con las mejores condiciones de aislamiento térmico respecto a otros productos industrializados del mercado que son poco amigables con el ambiente. Este, a su vez, será trabajado modularmente en elementos constructivos que recojan una tradición ancestral del lugar, y prestará especial interés en su aplicación a una envolvente activa como reinterpretación contemporánea de elementos tradicionales de la arquitectura local [8, 9].



**Figura 5.1.** Sinosteel International Plaza, MAD Architects. <http://www.imad.com/work/sinosteel-international-plaza/?cid=4>

La motivación de este primer momento como parte de la estructura general del trabajo de investigación doctoral antes mencionado obedece a la revisión de la materialidad de la envolvente, ya que, sumada al diseño del edificio, han demostrado ser los dos factores determinantes para conseguir el confort térmico interior. De ahí que las características de las fachadas es uno de los recursos de mayor impacto para conseguir la eficiencia energética en una edificación (ver figura 5.1).

Esto lo hemos visto en las revistas «arquitecturas» ganadoras de grandes reconocimientos a nivel mundial (ver figuras 5.2 y 5.3) y replicadas literalmente en localidades con una climatología y cultura completamente ajenas, lo cual es tremendamente contra-productivo, como ocurre en el caso de Quito. El uso de mampostería ligera y grandes ventanales, si bien es cierto que permite, entre otras cosas, elevar la temperatura interior de los espacios y aprovechar las bondades de la iluminación natural durante el día, también genera una gran preocupación, sobre todo en altas horas de la noche y madrugada, cuando la temperatura exterior desciende drásticamente y se percibe una gran pérdida de esa energía acumulada con sus respectivos bajos niveles en el confort térmico interior [6].



**Figura 5.2.** Casa Farnsworth, Mies Van Der Rohe. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-169324/clasicos-de-arquitectura-casa-farnsworth-mies-van-der-rohe/greg-robbins-3>



**Figura 5.3.** The Glass House, Philip Johnson. <https://www.pinterest.es/pin/408701734906781945/>

## Justificación

Esos picos de inesperado disconfort térmico en los espacios que se mencionan, sobre todo por las noches, son aquellos que evi-

dencian gran preocupación en la población, en especial en los padres, puesto que constantemente tienen que acudir al médico con sus hijos por afecciones respiratorias tales como: amigdalitis, faringitis, laringitis, crup, asma, entre otras; ocasionadas por estas edificaciones enfermas. Algo similar ocurre con ancianos y personas que sufren alguna discapacidad (ver figuras 5.4 y 5.5).



**Figura 5.4.** Atención médica a niña con afección respiratoria. <https://www.patronato.quito.gob.ec/noticias/254-evaluacion-medica-a-ninos-y-ninas-de-centros-de-atencion-infantil-se-realiza-con-miras-a-evitar-desnutricion.html>



**Figura 5.5.** Adultos mayores atendidos por afecciones respiratorias. <https://www.inclusion.gob.ec/adultos-mayores-deben-hacer-respetar-sus-derechos-solo-presentando-su-cedula-de-ciudadania/>

La bibliografía en general define al aislamiento térmico como la capacidad que tiene un material de servir como barrera y evitar conducir la temperatura que entre dos medios tratarían de igualarse naturalmente [10, 11]. Sin embargo, a partir de las limitaciones diagnosticadas en el estado del arte respecto a las características de algunos de estos materiales industrializados que se utilizan como aislante, entre las que se menciona lo poco amigables que son con el ambiente, surge la pertinencia e interés de estudio de la presente investigación para el ámbito específico de Quito.



**Figura 5.6.** Espuma de poliuretano proyectado. <https://www.albaniles.org/albanileria/espuma-de-poliretano-en-la-construccion-usos-ventajas-y-desventajas/>



**Figura 5.7.** Esquema de comportamiento del aislamiento térmico. [http://www.geocities.ws/davida\\_home/epsaislamiento.html](http://www.geocities.ws/davida_home/epsaislamiento.html)

En el caso de la ciudad de Quito, según se puede observar hoy en día, su arquitectura tradicional denota haber sido pensada por sus antiguos habitantes para adaptarse al clima del lugar, mediante los recursos que tenían a mano, como es el caso de una tipología de patio central y anchos muros de tierra (inercia térmica), que les permitían afrontar las condiciones climáticas y los fuertes vientos propios de la sierra [8, 9].



**Figura 5.8.** Casa quiteña tradicional de patio interior. <https://www.elcomercio.com/construir/casonas-centrohistorico-patrimonio-quito-funcion.html>



**Figura 5.9.** Casa quiteña tradicional de patio interior. <https://www.elcomercio.com/actualidad/museos-militares-quito-batalladepichincha.html>

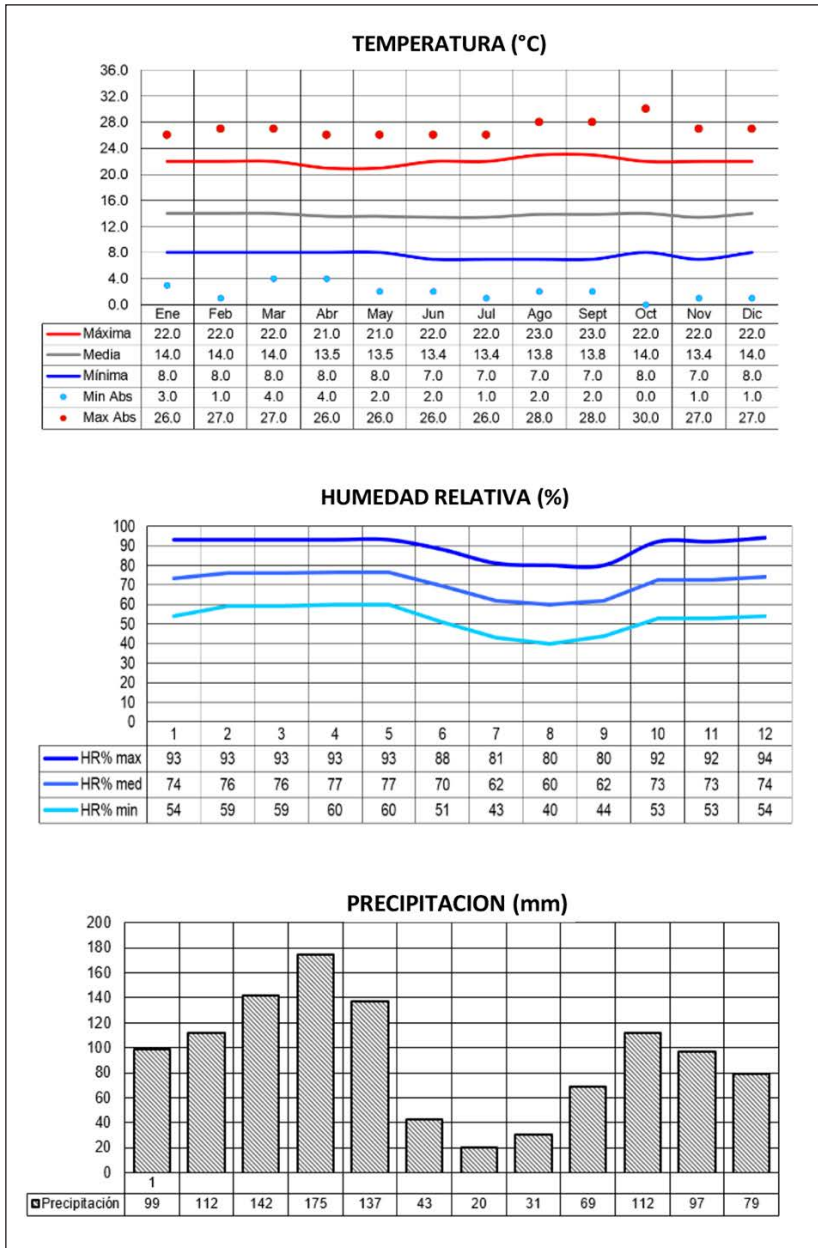
Contrario a las estrategias descritas en la tradicional «casa quiteña», el acelerado crecimiento de esta ciudad a través de los años ha provocado que su planificación urbana más bien plantee zonas con lotes de frentes cada vez más reducidos destinados al uso residencial, los cuales están sujetos a retiros perimetrales dispuestos por normativa, lo que hace que sea casi improbable

el uso de la inercia térmica mediante la construcción de anchos muros como alternativa edificatoria actual, dado el reducido del espacio interior que esto generaría. De ahí que replantear la envolvente de la tipología edificatoria retomando elementos de la arquitectura local como una reinterpretación contemporánea resulta una necesidad urgente y una motivación constante para el desarrollo de la presente investigación.



**Figura 5.10.** Panorámica de Quito desde El Panecillo. <https://www.hendrikseonline.com/Videos>

Aparentemente, Quito no resulta un reto en climatización durante el día (en ciertas épocas del año), según lo indican sus registros, pues presenta una temperatura media anual de  $13.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa media anual del  $71.2\%$ . Sin embargo, la temperatura mínima media anual es de  $7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , resultado de picos inferiores de hasta  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  que se han registrado en algunas noches durante diez años, a lo que habría que sumarle los vientos fríos predominantes y una considerable alta humedad. La temperatura máxima media anual, por otro lado, se registra en  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , llegando a tener días atípicos con hasta  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 5.11.** Datos climáticos de Quito. Software E-clim, Centro de Investigación Hábitat y Energía. Universidad de Buenos Aires.

## Metodología

Toda la metodología irá enfocada a desarrollar un sistema con un nivel de madurez tecnológico TRL 5 (desarrollo de un prototipo funcional escala real en un ambiente controlado o de laboratorio) [12].

Para esto, comenzaremos planteando un protocolo de investigación, seguido de la revisión de bibliografía relacionada al tema: fundamentos teóricos, normativa relacionada y material, además de estudiar varios trabajos afines que han hecho uso del aislamiento térmico como su objetivo.

Uno de estos trabajos al respecto lo viene desarrollando en Ecuador el Proyecto RAE (Refugio Antártico Ecuatoriano), como se puede ver en el enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=T6aGt2zUVeU>



**Figura 5.12.** Estructura. Proyecto Refugio Antártico Ecuatoriano. <http://www.arquitecturapanamericana.com/refugio-antartico-ecuadoriano/>



**Figura 5.13.** Prototipo terminado. Proyecto Refugio Antártico Ecuatoriano. <http://www.arquitecturapanamericana.com/refugio-antartico-ecuadoriano/>

Para una siguiente fase de la investigación será necesario reconocer características propias del lugar de estudio, como su ámbito climático, contexto cultural, etc., a fin de determinar estrategias que permitan enfrentar los requerimientos (exterior, interior, usuario). Con todo esto, la fase de diseño estaría rigurosamente fundamentada para traducirla en módulos de la envolvente que serán integrados a sistemas inteligentes básicos (fase de concepto), que finalmente serán probados en ambientes controlados de laboratorio que respondan a parámetros y variables específicas como un todo.

El presente trabajo resulta, por tanto, de gran impacto por el interés para otras regiones con climas similares (temperatura ex-



terior inferior a la zona de confort), donde la bibliografía en general recomienda que el diseño bioclimático de sus edificaciones debe responder en estos dos sentidos: elevar la temperatura interior y reducir las pérdidas de calor; [10] siendo el aislamiento térmico la estrategia sostenible pasiva más recomendada como herramienta contemporánea de climatización por su evidente mucho menor espesor, a diferencia de la inercia térmica citada al inicio de este escrito.

#### Inercia térmica en muros



**Figura 5.14.** Inercia térmica en muros de la casa quiteña tradicional. <http://museosdequitosextosemestrebleslygoyes.blogspot.com/2015/05/museo-camilo-egas.html>

#### Aislamiento térmico



**Figura 5.15.** Panel térmico y acústico. <https://www.pinterest.es/pin/459156124499175123/>

En resumen, la investigación propuesta forma parte del primer momento de un trabajo general estructurado en cuatro etapas: (1) desarrollo del material aislante; (2) análisis de necesidades térmicas exterior, interior y usuario; (3) diseño de módulos y envolvente; (4) implementación del sistema cyberfísico.

Por tanto, la primera fase persigue estos objetivos:

- **Objetivo general:** Responder a la necesidad inmediata de confort térmico interior por medio de la implementación de un nuevo sistema de aislamiento térmico en un contexto climático absolutamente cambiante e imprevisible como el de la ciudad de Quito.
- **Objetivos específicos:**
  - Estudiar el estado del arte respecto al tema y diagnosticar sus deficiencias.
  - Analizar las consideraciones del lugar con el fin de encontrar una envolvente que le permita a sus edificios responder

de una forma dinámicamente adaptable y contextualizada entre interior, exterior y usuario.

- Desarrollar un sistema de envolvente para los edificios de Quito, sensible a su contexto y a las necesidades inmediatas que sugiere el confort térmico interior en el lugar.
- Realizar un análisis económico de su implementación frente a otros productos actuales para las edificaciones que también promueven el consumo casi nulo de energía e incluso promueven energía positiva para sí mismos. Tal es el caso de la normativa de construcción establecida por Canadá para el 2030.

## Viabilidad de la investigación

Este trabajo resulta totalmente viable, por su concreta e inmediata aplicación en el bienestar de las personas, el cual se apoya en investigaciones previas y en marcha desarrolladas en la Universidad de Extremadura, la TU Delft y la Universidad UTE, entre otras; que han manifestado, además, estar comprometidas y con la mejor predisposición de participar en el mismo, por lo que no se han encontrado barreras de ningún tipo en los aspectos económicos, técnicos, sociales, políticos, ambientales y demás.

## Resultados

De lo expuesto anteriormente, se espera desarrollar el prototipo funcional de un sistema activo avanzado de envolvente que sugiere aislamiento térmico a un nivel de madurez tecnológico TRL 5 (desarrollo de un prototipo funcional a escala real en un ambiente controlado o de laboratorio), el cual promueva competitivos niveles de eficiencia en cuanto a aislamiento térmico y respecto a otros productos industrializados existentes en el mercado, muchos de los cuales resultan altamente contaminantes para el ser humano y el medioambiente que lo rodea.

De ahí que los esfuerzos de este trabajo estarán encaminados en todo momento a evidenciar el potencial de aislamiento que sugiere esta envolvente desarrollada con materiales tradicionales y ecológicos del lugar, los cuales estarán acompañados por un

sistema de tecnologías emergentes que emplea las TIC para una mayor eficiencia, sin descuidar que en su respuesta intuitiva no invasiva se tenga al bienestar del ser humano como su principal objetivo [13, 14, 15].

Con esto seguramente se abrirá un gran debate sobre el nuevo rol que debe jugar la arquitectura para generar el bienestar de sus ocupantes..., incluso cuando ellos descansan, a la vez que se daría la bienvenida a los sistemas inteligentes básicos como uno de sus pilares conceptuales [16], capaz de agregar valores estéticos, culturales y sostenibles al edificio.



**Figura 5.16.** Fibras naturales existentes en el contexto ecuatoriano. <https://verdecora.es/blog/usos-fibra-coco-huerto>



**Figura 5.17.** Investigación de estructuras integradas por módulos de ecocerámica. <https://www.archiprix.org/2019/?project=2577>



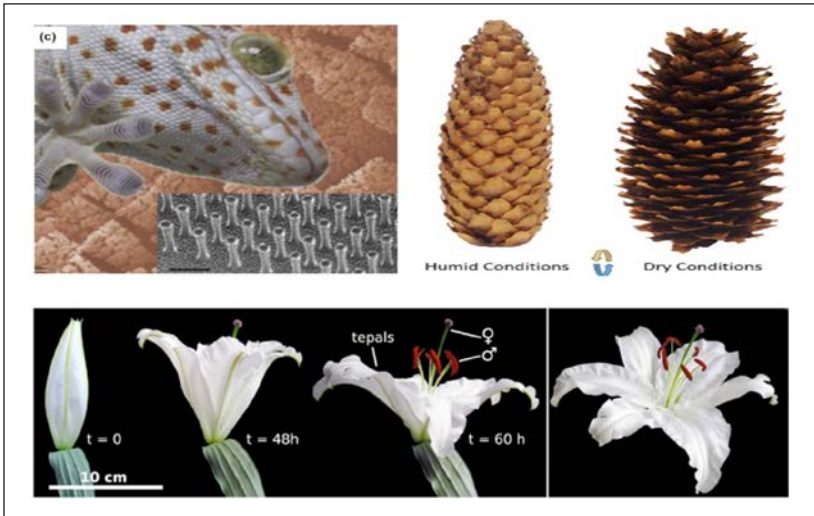
**Figura 5.18.** Proyecto Mountain City diseñado para el concurso ÉVULO 2012. <http://www.evolo.us/category/2012/page/2/>

## Conclusiones

El desarrollo de este sistema de envolvente será, por tanto, el producto de haber entendido las potencialidades y limitaciones que los sistemas vivos sugieren para adaptarse a las condicionantes específicas de un lugar, las mismas que, interpretadas junto a variables de estudio, permitirán dar respuestas más contundentes en función de las necesidades de la población de manera inmediata.

Un sistema activo avanzado de envolvente que integra tecnología TIC con estrategias tradicionales de climatización pasiva/ aislamiento térmico será, por tanto, el camino para responder a los objetivos que se plantea esta investigación, y con esto, repensar a la arquitectura del lugar. Una arquitectura autónoma en búsqueda de una relación más directa entre el usuario y su entorno, consiguiendo de esta manera resultados muy alentadores en términos de eficiencia energética, morfología, identidad, confort y salud de sus ocupantes [17].

En resumen, el presente estudio no solo se muestra muy atractivo por aportar características térmicas a los espacios, sino también atributos acústicos, ambientales y estéticos.



**Figura 5.19.** Sistemas naturales aplicados en envolventes adaptativas en el campo de la construcción, Al-Obaidi Karam M; Azzam Ismail, Muhammad; Hussein, Hazreena; Malik Abdul, Abdul, «Biomimetic building skins: An adaptive approach», 2017.

Con esto se abre la posibilidad de implementar nuevos trabajos que, integrando fibras naturales y material reciclable de un lugar con sistemas de tecnologías emergentes, respondan con una arquitectura contemporánea menos apática y más activa entre el usuario y el medioambiente, mientras enfrentan integralmente los aspectos: formales, funcionales, técnico-estructurales, culturales, medioambientales y socioeconómicos.

## Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
- [2] Leeson (2011). *A Ocean Plastic* (film)
- [3] Beraldo A. L (2011). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales como fuente sostenible de materiales de construcción*. CYTED.

- [4] Velasco, L., Goyos, L., Nicolás, F. y Naranjo, C. (2015). Investigación y desarrollo de aislantes térmicos naturales basados en residuos de biomasa para su aplicación en la mejora de la eficiencia energética de las edificaciones en América Latina. *Revista Ingeniería y Sociedad, UC*, 10, (1). Latindex.
- [5] TSI Incorporated (2013). *Indoor air quality handbook: quality a practical guide to indoor air quality investigations*. TSI, Incorporated, Shoreview, MN.
- [6] Sarbu, I. y Sebarchievici, C. Aspects of indoor environmental quality assessment in buildings. *Energy and Buildings*, 60, 410-419.
- [7] Norma Técnica Ecuatoriana (1993). *Bloques huecos de hormigón* (p. 2). Quito.
- [8] Dirección de Planificación IMQ (1991). *Centro histórico de Quito: la vivienda* (pp. 70-78). Quito.
- [9] Moya, R., Peralta, E. (1994). *Casas del Ecuador* (pp. 26-27). Quito.
- [10] Evans, M., De Schiller, S. (2006). *Taller de diseño bioambiental*. Centro de Investigación Hábitat y Energía, FADU, Universidad de Buenos Aires (ponencia en Quito).
- [11] Evans, M. (1980). *Housing, climate and confort*. Nueva York.
- [12] NASA (1989). *Technology readiness level (TRL). Math for innovative SMES*.
- [13] Sakhare, V. V. y Ralegaonkar, R. V. (2014). Indoor environmental quality: Review of parameters and assessment models. *Architectural Science Review*, 57 (2), 147-154.
- [14] Al Horr, Y., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A. Kaushik, A. y Elsarrag, E. (2016). Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: a review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5 (1), pp. 1- 11.
- [15] Roulet, C. A., Bluysen, P. M., Müller, B. y De Oliveira Fernandes, E. (2012). Design of healthy, comfortable, and energy-efficient buildings. En: Rassia, S. T. y Pardalos, P. M. (eds.). *Springer optimization and its applications* (v. 56, Sustainable environmental design in architecture: impacts on health) (pp. 83-108). Nueva York: Springer.
- [16] Al-Obaidi Karam, M., Azzam Ismail, M., Hussein, H., Malik Abdul, A. (2017). Biomimetic building skins: an adaptive approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Scopus.
- [17] Kolokotsa, D. y Santamouris, M. (2015). Review of the indoor environmental quality and energy consumption studies for low income households in Europe (eng). *The Science of the Total Environment*, 536, 316-330.



# Degradación medioambiental y crecimiento económico: la hipótesis EKC para España y Portugal

*Environmental degradation and economic growth:  
EKC hypothesis for Spain and Portugal*

ISMAEL PÉREZ FRANCO  
Departamento de Economía,  
Universidad de Extremadura, Badajoz.  
ismperez@unex.es

AGUSTÍN GARCÍA GARCÍA  
Departamento de Economía,  
Universidad de Extremadura, Badajoz.

## Resumen

En este trabajo se analiza la existencia de la curva de Kuznets Ambiental (EKC) para España y Portugal, dos países que han tratado de desvincular su crecimiento económico del consumo creciente de energía procedente de fuentes fósiles, mediante una importante apuesta por el fomento de las energías renovables. Los resultados de las estimaciones muestran cierta evidencia compatible con la existencia de una EKC para cada país. Es decir, sí parece existir esa tendencia a reducir, en etapas de cierto desarrollo económico, la contaminación que va asociada al aumento de la producción y la renta de las etapas iniciales de crecimiento económico. Parece que España podría estar ya en esa fase de reducción del daño medioambiental; mientras que Portugal todavía no habría alcanzado el máximo.

**Palabras clave:** degradación del medioambiental, crecimiento económico, curva de Kuznets.

## Abstract

This paper analyzes the existence of the Environmental Kuznets Curve (EKC) for Spain and Portugal. These two countries have tried to decouple economic growth from fossil fuel energy consumption by a significant commitment to the promotion of renewable energies. The results show some evidence compatible with the existence of an EKC for each country. I.e., there seems to be a trend to reduce, during stages high economic development, the environmental contamination associated with increasing production and income linked to the beginning stages of economic growth. It seems that Spain could be in the reducing environmental damage stage; while Portugal still would not have reached the maximum.

**Keywords:** environmental degradation, economic growth, energy, Kuznets Curve.

## Introducción

Algunos de los rasgos definitorios de la ciencia económica están presentes en la raíz griega de la palabra *economía*. Así, los términos griegos *oikos* (casa) y *nomos* (regla), señalan el interés del ser humano por conseguir un adecuado «gobierno de la casa» o «administración doméstica». Igualmente, la contraposición entre la limitación en los recursos y unas necesidades ilimitadas ha estado también tradicionalmente vinculada al concepto de economía, que puede definirse como la ciencia que estudia cómo gestionar los recursos escasos para afrontar las necesidades de los individuos, incrementando el bienestar. La macroeconomía, que trata de situar el problema anterior en un entorno nacional o global, ha marcado como objetivos tradicionales la búsqueda del pleno empleo, el control de los precios y el crecimiento del producto. A pesar de que el análisis macroeconómico tradicional ha prestado poca atención al medioambiente, esta situación parece estar cambiando debido, entre otras razones, a la magnitud que ha alcanzado la actividad económica global y a los efectos incuestionables que está produciendo esta actividad en el entorno, incluido el fenómeno conocido como cambio climático. Por ese motivo, la política macroeconómica está ampliando su marco de análisis incorporando, además de los objetivos tradicionales, cuestiones como las restricciones derivadas de la limitación en la disponibilidad de recursos, el medioambiente, la generación de residuos o la contaminación.



Por otro lado, el producto interior bruto (PIB) y otras medidas similares del producto agregado han sido habitualmente utilizadas como referencia para medir el crecimiento económico de los países y el bienestar de los ciudadanos, a pesar de la amplia lista de limitaciones que la literatura especializada identifica en la definición de estas medidas de producción. Entre otras, las principales limitaciones se refieren, por ejemplo, a que el PIB no incluye la producción originada en la economía informal o el trabajo voluntario, que no pasan por el mercado, pero sí afectan al bienestar de los ciudadanos. Tampoco se recogen los cambios en la relación entre el tiempo dedicado al ocio y al trabajo, ni conceptos tales como la inseguridad, la salud de la población o la distribución de la renta.

A pesar de todas estas críticas y limitaciones, si bien se reconoce que el PIB no mide el bienestar de los individuos, sí ha sido generalmente aceptado que el aumento del PIB va unido a incrementos en el bienestar. En las últimas décadas se ha puesto en evidencia la limitación de la contabilidad nacional estándar en cuanto a su incapacidad de captar el deterioro medioambiental. Por ese motivo, han surgido diversos intentos por desarrollar enfoques que permitieran incorporar cuestiones como el agotamiento de los recursos o el deterioro del medioambiente en las cuentas nacionales,<sup>1</sup> con el fin de conseguir una aproximación más cercana al concepto de bienestar. A pesar de que el crecimiento económico, medido a través de la variación del PIB real, ha mostrado un incremento notable en casi todos los países del mundo, su evolución se ha visto estrechamente vinculada al consumo de energía, procedente sobre todo de fuentes no renovables y, por lo tanto, generadoras de emisiones de gases a la atmósfera.

La preocupación creciente de los economistas por el deterioro medioambiental se ha reflejado en el desarrollo de la hipótesis de la curva de Kuznets ambiental (a partir de aquí EKC, por sus iniciales en inglés), que relaciona la degradación del medioambiente con el crecimiento económico y que, más específicamente, puede vincular ese crecimiento de la actividad económica con la emisión de los gases que están detrás del calentamiento global y del efecto invernadero.

Anteriormente hemos puesto de manifiesto las limitaciones del PIB como medida del bienestar. Esta limitación se puede ex-

1. Ver, por ejemplo, Lennox *et al.* (2019).

tender a la otra variable utilizada para el contraste de la EKC, ya que la degradación ambiental debe ser incluida en la relación con una variable específica. No todos los contaminantes siguen la misma trayectoria temporal ni tienen las mismas implicaciones sobre el deterioro del medioambiente. En este sentido, el trabajo empírico suele utilizar el valor de las emisiones de CO<sub>2</sub> como medida de la degradación medioambiental asociada al crecimiento económico. Este será el enfoque que adoptemos en nuestro análisis empírico.

En este trabajo se analiza la existencia de la EKC para España y Portugal, dos países que han tratado de desvincular su crecimiento económico del consumo creciente de energía mediante una importante apuesta por el fomento de las energías renovables. En el siguiente apartado se explican los fundamentos teóricos de la EKC. En el tercer apartado se describe brevemente el crecimiento económico de España y Portugal, y sus vínculos con el consumo de energía. Además, se presentan los datos utilizados en el trabajo empírico. En el apartado cuarto se plantean las estimaciones econométricas. Finalmente, se ofrecen las principales conclusiones.

## Crecimiento y medioambiente

La idea que subyace tras la EKC sostiene que la relación entre la contaminación y la producción se refiere a que la emisión de contaminantes y, por tanto, la degradación medioambiental aumentan con el incremento de la actividad económica durante las primeras etapas del crecimiento económico, pero tiende a disminuir a partir de cierto nivel de desarrollo de la economía. Esta idea sugiere que la relación entre emisiones contaminantes y producción tendría forma de U invertida. Esta hipótesis tiene fuertes implicaciones, ya que supone que la degradación ambiental puede ser frenada en algún momento por políticas que protegen el medioambiente y que a la vez sean compatibles con el crecimiento económico.

La relación en forma de U invertida, debido a la similitud con la curva de Kuznets,<sup>2</sup> ha dado lugar a la denominación de curva

2. Kuznets (1955) analizaba la conexión a largo plazo entre el ingreso per cápita y la desigualdad.

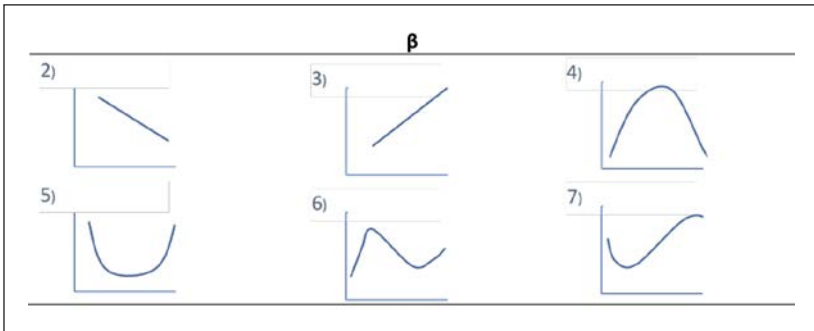
de Kuznets ambiental, que ha tenido un amplio desarrollo teórico y empírico en los últimos años a partir de los trabajos iniciales de autores como Grossman y Krueger (1991), Shafik y Bandopadhyay (1992), Panayotou (1993), o Holtz-Eakin y Selden (1995). A partir de estos análisis se han desarrollado diversas estrategias para realizar trabajos empíricos con resultados contradictorios recogidos en la literatura (Özokcu y Özdemir, 2017). Así, por ejemplo, podemos considerar la siguiente expresión general que presenta una relación cúbica entre la degradación medioambiental ( $Y_{it}$ ) y la variable renta ( $X_{it}$ ):

$$Y_{it} = \alpha_i + \beta_1 X_{it} + \beta_2 X_{it}^2 + \beta_3 X_{it}^3 + \beta_4 Z_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

La cual, además, incluye una variable adicional ( $Z_{it}$ ) para recoger otros factores que puedan influir en la degradación del medioambiente.<sup>3</sup> El parámetro  $\alpha_i$  es el término constante y  $\varepsilon_{it}$  es el término de error. Los subíndices  $i$  y  $t$  representan el país y el tiempo respectivamente. Siguiendo a Dinda (2004), podemos realizar las siguientes interpretaciones de los parámetros estimados:

1. Si  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ : no existe relación entre la variable dependiente  $Y_t$  y la variable independiente  $X_t$ .
2. Si  $\beta_1 > 0$  y  $\beta_2 = \beta_3 = 0$ : existe una relación lineal creciente entre  $X_t$  e  $Y_t$ .
3. Si  $\beta_1 < 0$  y  $\beta_2 = \beta_3 = 0$ : existe una relación lineal decreciente entre  $X_t$  e  $Y_t$ .
4. Si  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 < 0$  y  $\beta_3 = 0$ : existe una forma de U invertida, compatible con la EKC.
5. Si  $\beta_1 < 0$ ,  $\beta_2 > 0$  y,  $\beta_3 = 0$ : existe una relación cuadrática en forma de U.
6. Si  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 < 0$  y  $\beta_3 > 0$ : existe una relación polinómica en forma de N.
7. Si  $\beta_1 < 0$ ,  $\beta_2 > 0$  y  $\beta_3 < 0$ : existe una relación polinómica en forma de N invertida.

3. La variable Z ha sido utilizada en los estudios empíricos para incluir factores tales como el gasto público en I+D+i energético, en Balsalobre *et al.* (2016); la situación institucional o la distribución de la renta (a través del índice de GINI), en Correa *et al.* (2005), o el peso de la energía nuclear en la matriz energética, la densidad de la población y los precios del petróleo, en Díaz-Vázquez y Cancelo (2009), por ejemplo.



**Figura 6.1.** Formas de la relación contaminación-producto en función de los valores de  $\beta$ . Fuente: Ekins (1997).

Como puede verse, solo uno de los posibles resultados es compatible con la EKC. En el trabajo citado puede encontrarse un repaso a la literatura empírica y una serie de explicaciones sobre las posibles interpretaciones de los resultados obtenidos en los distintos trabajos. En Apergis (2016) se realizan estimaciones de la existencia de la EKC con datos de 15 países durante el período 1960-2013. Las estimaciones, realizadas tanto en emisiones de cada país como con datos de panel, dieron como resultado evidencia a favor de la EKC para la mayoría de los países de la muestra, incluyendo España y Portugal. Özokcu y Özdemir (2017), con datos del período 1980-2010, encuentran evidencia de una relación polinómica en forma de N invertida, no compatible con la EKC, para 26 países de la OCDE con renta alta. Ese resultado contrario a la EKC se repite con datos de 52 países de economías emergentes, para los que encuentran evidencia de una relación polinómica en forma de N entre las emisiones y el PIB. A pesar de estos resultados, los autores señalan la importancia de incluir el uso de la energía en este tipo de análisis de relación entre crecimiento económico y protección medioambiental.

Nosotros seguiremos una especificación basada en el planteamiento de Ekins (1997) a partir de la siguiente ecuación:

$$E_t = \beta_0 + \beta_1 \gamma_t + \beta_2 \gamma_t^2 + \varepsilon_t \quad (2)$$

Donde  $E_t$  es la variable medioambiental, en este caso el logaritmo del  $\text{CO}_2$  per cápita,  $\gamma_t$  es la variable de bienestar, en este caso

el logaritmo del PIB per cápita;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son los parámetros que indican la forma funcional de la ecuación y  $\varepsilon_i$  es el error. Jaunky (2011) también plantea una estimación similar en logaritmos:

$$E_{it} = \beta_0 + \beta_1 \gamma_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

Donde  $\beta_1$  es la elasticidad entre el PIB per cápita y las emisiones. Una elasticidad mayor que la unidad indicaría que un aumento del PIB per cápita provoca un aumento más que proporcional del CO<sub>2</sub> per cápita, lo que podría asociarse con una baja responsabilidad ambiental en la fase inicial de degradación ambiental. Una elasticidad entre 0 y 1 significa que un incremento en los ingresos conlleva a un aumento menos que proporcional en las emisiones. Por último, si la elasticidad es menor que 0, podríamos interpretar que se trata de una economía preocupada por la degradación medioambiental.

## Crecimiento y energía en España y Portugal

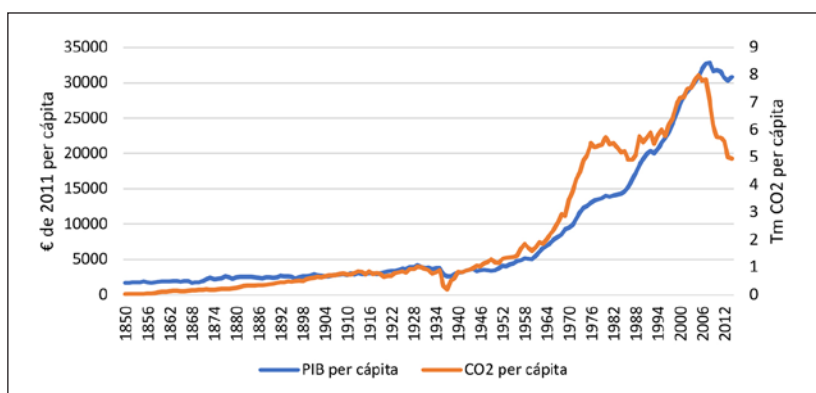
España y Portugal asumieron el reto marcado por la «estrategia 20-20-20», con una importante apuesta por las energías renovables que ha condicionado la evolución reciente del sector de la energía en Europa y, especialmente, en ambos países. La estrategia, definida para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador, consistía en un conjunto de medidas incluidas en la legislación vinculante para los países de la UE que intentaban garantizar el cumplimiento de una serie de objetivos climáticos y de energía para 2020 (20% de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los niveles de 1990, 20% de energías renovables en la UE, 20% de mejora de la eficiencia energética).

Como indican García *et al.* (2017), este acuerdo, alcanzado en 2007, y su posterior constatación en la directiva de 2009 se situaron temporalmente al final de un período en el que las dos economías habían experimentado una época de crecimiento económico sin precedente en su historia moderna. El producto per cápita portugués había alcanzado niveles que rondaban el 80% de la media europea; mientras que en el caso español se había superado el valor medio europeo tras unos años de convergencia. La Directiva Europea 2009/28/CE sostiene que se

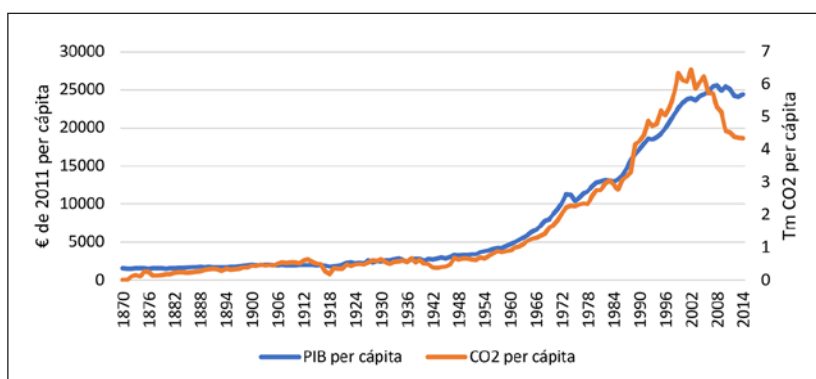
pueden presentar oportunidades para generar «crecimiento económico mediante la innovación y una política energética competitiva y sostenible». Asimismo, afirma que «las innovaciones regionales y locales en la producción de energía procedente de fuentes renovables generan en los Estados miembros y en sus regiones importantes oportunidades de crecimiento y empleo». Aprovechar esas oportunidades ha sido la intención de los gobiernos portugués y español, expresada sucesivamente en la transposición de las directivas europeas a las respectivas legislaciones nacionales. En 2010, por ejemplo, Portugal aprueba el Plano de Nacional Acção para as Energias Renováveis (PNAER), que establece entre los objetivos fundamentales, además de garantizar el cumplimiento de los compromisos europeos para 2020 en materia de energía y lucha contra el cambio climático, el impulso y consolidación del sector industrial asociado a las energías renovables. Pérez-Franco *et al.* (2020) analizan los efectos del proceso de transformación y modernización del sector de la energía y de la economía en España y Portugal, y encuentran cierta evidencia de causalidad entre algunos tipos de energías procedentes de fuentes renovables y el crecimiento económico de ambos países. Precisamente, el fomento de energías de fuentes renovables y su vinculación con el crecimiento del producto pueden ayudar a explicar una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero en economías con incrementos en el PIB, tal como predice la EKC a partir de ciertos niveles de desarrollo.

Para realizar el análisis se utilizarán datos del PIB per cápita y de emisiones de CO<sub>2</sub> de ambos países, así como datos de las comunidades autónomas españolas, que nos permitirán profundizar en el análisis con un enfoque más desagregado para el caso español. Concretamente, los datos del PIB per cápita a precios constantes nacionales corresponden al período 1850-2014 (España) y 1870-2014 (Portugal), y se han obtenido a partir de la base de datos del Proyecto Madison (2020). Los datos de las emisiones de CO<sub>2</sub> están medidos en toneladas métricas de dióxido de carbono por persona y han sido obtenidos de Centro de Análisis de Información sobre Dióxido de Carbono (CDIAC), elaborados por Boden *et al.* (2017). La longitud de la serie va desde 1850 hasta 2014 para el caso de España, y desde 1870 hasta 2014 para Portugal.

Las figuras 6.2 y 6.3 muestran la evolución de las dos variables de referencia (PIB per cápita y CO<sub>2</sub> per cápita) para ambos países. En ellas se puede observar que en ambos casos existe un cambio de tendencia en los años sesenta, explicado por el denominado *Golden Age*, que según algunos autores constituyó el principal impulso económico de los países de la periferia europea (Tamarit, 2011). Igualmente se observa la tendencia continua de incremento de los valores de PIB per cápita y CO<sub>2</sub> per cápita. Portugal alcanzó el valor máximo de emisiones en el año 2002; España, en 2005. Ambos países alcanzan el PIB per cápita máximo en el año 2008. Las estadísticas descriptivas de las series se recogen en la tabla 6.1.



**Figura 6.2.** PIB per cápita y emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita. España. Fuente: Proyecto Madison (2020) para el PIB y Boden *et al.* (2017) para el CO<sub>2</sub>.



**Figura 6.3.** PIB per cápita y emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita. Portugal. Fuente: Proyecto Madison (2020) para el PIB y Boden *et al.* (2017) para el CO<sub>2</sub>.

**Tabla 6.1.** Estadísticas descriptivas del PIB pc y de las emisiones de CO<sub>2</sub> pc

	Variable	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación típica	Obs.
España	CO <sub>2pc</sub>	2.127376	0.855392	7.997581	0.033238	2.39223	165
	PIB <sub>pc</sub>	8099.348	3435	32844.33	1701	9007.005	165
Portugal	CO <sub>2pc</sub>	1.634738	0.613011	6.449189	0.005085	1.867893	145
	PIB <sub>pc</sub>	7443.253	2844	25590.88	1486	7841.879	145

Elaboración propia a partir de datos de Proyecto Madison (2020) para el PIB y Boden *et al.* (2017) para el CO<sub>2</sub>.

En las figuras se observa que, en los dos países, las series de producción y de emisiones comienzan a separarse a partir de sus valores máximos, comenzando una evolución divergente que puede estar asociada a las diferentes situaciones de crisis económica que han sufrido ambos países, pero que también podrían asociarse a la nueva tendencia del crecimiento ligado a la innovación tecnológica y a un mayor nivel de protección ambiental, situaciones compatibles con la teoría subyacente en la EKC y que concuerdan con los resultados de Pérez-Franco *et al.* (2020). En el caso de España se observa que la divergencia se vuelve más abrupta que en el caso portugués.

En este trabajo se estimará también la EKC para el caso específico de las comunidades autónomas de España, profundizando así el análisis con datos más concretos y actuales de la realidad española (aunque también de un período más corto). Los datos del PIB per cápita, a precios corrientes, proceden del Instituto Nacional de Estadística (2020). Las series se han deflactado a precios constantes de 2015 a partir de datos de Banco Mundial (2019). Los datos de gases de efecto invernadero (GEI) proceden del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020); corresponden al período comprendido entre 2000 y 2018 y están medidos en kilotoneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>.



**Tabla 6.2.** Estadísticas descriptivas del PIB pc y de las emisiones de CO<sub>2</sub> pc (CC.AA.)

	Variable	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación típica	Obs.
Andalucía	CO <sub>2pc</sub>	0.007121	0.00705	0.008691	0.005883	0.000948	19
	PIB <sub>pc</sub>	17519.93	17536.06	18962.67	16017.92	887.4604	19
Aragón	CO <sub>2pc</sub>	0.014416	0.0143	0.017318	0.011551	0.002116	19
	PIB <sub>pc</sub>	25046.17	24969.23	27378.85	22583.97	1242.301	19
Asturias	CO <sub>2pc</sub>	0.02711	0.025098	0.033171	0.020427	0.004567	19
	PIB <sub>pc</sub>	20537.26	20715.95	22397.41	18128.24	1223.628	19
Islas Baleares	CO <sub>2pc</sub>	0.009658	0.009879	0.012053	0.007357	0.001591	19
	PIB <sub>pc</sub>	25799.18	26395.97	27710.32	23378.8	1324.414	19
Comunidad Valenciana	CO <sub>2pc</sub>	0.005969	0.005862	0.007043	0.0049	0.000849	19
	PIB <sub>pc</sub>	20908.38	21391.46	22139.96	19047.94	954.4085	19
Islas Canarias	CO <sub>2pc</sub>	0.007669	0.007549	0.009439	0.005959	0.00132	19
	PIB <sub>pc</sub>	20486.95	20318.95	21840.12	18571.42	1197.76	19
Cantabria	CO <sub>2pc</sub>	0.011379	0.011041	0.012969	0.009545	0.001228	19
	PIB <sub>pc</sub>	21662.23	21617.49	23105.37	20176.42	912.2967	19
Cataluña	CO <sub>2pc</sub>	0.006939	0.0067	0.008553	0.005512	0.001103	19
	PIB <sub>pc</sub>	27563.15	27372.72	29591.44	25877.79	1074.917	19
Ceuta	CO <sub>2pc</sub>	0.006768	0.007185	0.010402	0.003676	0.00233	19
	PIB <sub>pc</sub>	19562.61	19494.93	20923.72	18246.56	805.0078	19
Castilla La Mancha	CO <sub>2pc</sub>	0.011551	0.011288	0.014315	0.008728	0.002292	19
	PIB <sub>pc</sub>	18434.64	18452.24	19804.46	16817.73	892.3786	19
Castilla Y León	CO <sub>2pc</sub>	0.014798	0.013679	0.018731	0.01052	0.002706	19
	PIB <sub>pc</sub>	21508.11	21604.99	23371.85	19554.94	979.8994	19
Extremadura	CO <sub>2pc</sub>	0.0084	0.008428	0.00935	0.007584	0.000548	19
	PIB <sub>pc</sub>	15967.14	16139.04	18254.18	13711.7	1186.388	19
Galicia	CO <sub>2pc</sub>	0.011878	0.01127	0.013994	0.009893	0.001455	19
	PIB <sub>pc</sub>	19925.61	20242.79	22547.11	16751.53	1565.982	19

La Rioja	CO <sub>2pc</sub>	0.008793	0.00802	0.013273	0.006262	0.002183	19
	PIB <sub>pc</sub>	25141.33	25013.09	26478.24	23872.38	774.0845	19
Comunidad de Madrid	CO <sub>2pc</sub>	0.003993	0.003886	0.004716	0.003267	0.000567	19
	PIB <sub>pc</sub>	31302.87	31100	34079.86	28885.21	1330.032	19
Melilla	CO <sub>2pc</sub>	0.004931	0.004884	0.005757	0.004031	0.000481	19
	PIB <sub>pc</sub>	18537.78	18705.41	20253.82	16666.32	1222.217	19
Murcia	CO <sub>2pc</sub>	0.006801	0.006547	0.009095	0.005806	0.000837	19
	PIB <sub>pc</sub>	19378.8	19278.95	20685.61	18055.29	852.7589	19
Navarra	CO <sub>2pc</sub>	0.011092	0.010593	0.014296	0.008783	0.001755	19
	PIB <sub>pc</sub>	28712.23	28520	30528.03	27146.85	1026.863	19
País Vasco	CO <sub>2pc</sub>	0.009661	0.01014	0.011741	0.007564	0.001532	19
	PIB <sub>pc</sub>	29405.77	29541.74	32311.73	26453.34	1564.39	19
Toda la muestra	CO <sub>2pc</sub>	0.009944	0.008744	0.033171	0.003267	0.005302	361
	PIB <sub>pc</sub>	22494.74	21332.07	34079.86	13711.7	4440.301	361

Elaboración propia a partir de datos del INE (2020) para el PIB per cápita y del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020) para el CO<sub>2</sub> per cápita.

## Estimación de la EKC

Para la realización de este análisis empírico en el que se estimará una EKC para España y Portugal, hemos trabajado con las variables en logaritmos para evitar la heterocedasticidad de las variables. Además, antes de realizar las estimaciones, será necesario verificar la no estacionariedad en media con el fin de evitar una regresión espuria. Para ello se realizará la prueba de raíces unitarias mediante la prueba de Dickey-Fuller Ampliado (Dickey y Fuller, 1979):

$$\Delta X_t = \theta_0 + \varphi_0 t + \varphi_1 X_{t-1} + \sum_{i=1}^m \theta_i \Delta X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4)$$

Donde  $X_t$  representa cada una de las variables (en nuestro caso, el PIB per cápita y CO<sub>2</sub> per cápita de España y Portugal) en el momento  $t$ ,  $\varepsilon_t$  es la perturbación con distribución  $(0, \sigma^2)$  y  $m$  es el orden de retraso. Si es significativamente menor que cero, entonces se rechaza la hipótesis nula de una raíz unitaria.

Si las series son no estacionarias en media, se realizará la prueba de cointegración de Johansen. Esta prueba evalúa si las series están cointegradas, es decir, a pesar de que se muevan conjuntamente a lo largo del tiempo, las diferencias entre ellas son estacionarias, aun cuando las series sean no estacionarias por separado. Si ambas series son no estacionarias de orden 1 pero las series son integradas, esto nos dirá que la combinación lineal de las series será de orden 0, o sea, estacionaria. Siguiendo a Johansen (1991), inicialmente consideraremos un vector autorregresivo de orden  $p$ :

$$\gamma_t = A_1\gamma_{t-1} + \dots + A_p\gamma_{t-p} + Bx_t + \epsilon_t, \quad (5)$$

Donde  $\gamma_t$  es el vector de la variable no estacionaria de orden 1,  $I(1)$ , que, en este caso serán las emisiones de  $\text{CO}_2$  per cápita;  $x_t$  es el vector de la variable explicativa, que será el PIB per cápita, y  $\epsilon_t$  es la perturbación. Esta ecuación se puede escribir de la siguiente forma:

$$\Delta\gamma_t = \Pi\gamma_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i\Delta\gamma_{t-i} + Bx_t + \epsilon_t, \quad (6)$$

Donde:

$$\Pi = \sum_{i=1}^p A_i - I, \quad \Gamma_i = -\sum_{j=i+1}^p A_j \quad (7)$$

Siguiendo el teorema de representación de Granger (Reinhard, 2005), si la matriz de los coeficientes  $\Pi$  ha reducido su rango, de tal forma que existen  $k \times r$  matrices  $\alpha$  y  $\beta$ , cada una con rango  $r$ , tal que  $\Pi = \alpha\beta'$  y  $\beta'\gamma_t$  es  $I(0)$ , en ese caso,  $r$  es el número de relaciones de cointegración (el rango de cointegración) y  $\beta$  es el vector de cointegración. El método de Johansen se encarga de estimar la matriz de coeficientes de la matriz  $\Pi$  a partir del vector autorregresivo sin restricciones para probar si se pueden rechazar más restricciones que implican la reducción del rango de  $\Pi$ . A continuación, una vez que las variables den como resultado una serie estacionaria, se estima la regresión de la hipótesis de la EKC. En nuestro caso lo haremos a partir de la expresión planteada por Ekins (1997), citada anteriormente:

$$E_t = \beta_0 + \beta_1\gamma_t + \beta_2\gamma_t^2 + \epsilon_t \quad (2)$$

A partir de los resultados de las estimaciones, si obtenemos valores acordes con la EKC, calculamos cuál es el punto de producto per cápita (o de bienestar) a partir del cual cambia la tendencia de la curva, pasando de una tendencia creciente en la relación contaminación-producto a una tendencia decreciente en relación con el producto (o el bienestar del país). Para ello, si consideramos una ecuación cuadrática, deberemos calcular el máximo de la ecuación anterior. Tras derivar e igualar a cero, obtenemos el valor estimado del punto máximo de la curva:<sup>4</sup>

$$y^* = \frac{-\beta_1}{2\beta_2}. \quad (8)$$

En las tablas siguientes se ofrecen los resultados obtenidos en las estimaciones de la EKC para España y Portugal. Posteriormente se ofrece también una aproximación a la curva obtenida mediante el análisis con datos de panel de las comunidades autónomas. Previamente, en tabla 6.3 se presentan los resultados de la prueba de Dickey-Fuller ampliado, usado para analizar la estacionariedad en media de las variables. Como ya se comentó anteriormente, las variables están en logaritmos.

**Tabla 6.3.** Análisis de estacionariedad

	España		Portugal	
	PIB per cápita	CO2 per cápita	PIB per cápita	CO2 per cápita
Niveles	-1.011	-2.813	-1.871	-7.564***
Primeras diferencias	-10.887***	-10.842***	-12.519***	-10.411***

\*, \*\*, \*\*\* indican si la hipótesis nula de raíces unitarias es rechazada al 10%, 5% o 1% de nivel de significación, respectivamente.

La prueba se ha realizado con tendencia e intercepto. Se observa que todas las series son I(1), excepto en el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Portugal, que sí es estacionaria en niveles, siéndolo también en primeras diferencias. Por otro lado, en la tabla 6.4 se muestran los resultados de la prueba de cointegración de

4. Para calcular el resultado en niveles, se deberá realizar la transformación pertinente de los resultados obtenidos en la ecuación 8.

Johansen para los dos países, obteniendo en ambos casos un resultado de cointegración de orden 1. Esperamos, por tanto, que la combinación lineal de las series no resulte en una relación espuria. Al igual que en el caso anterior, la prueba se ha realizado con intercepto.

**Tabla 6.4.** Análisis de cointegración

	Relación	$H_0 : r$	$n - r$	$\lambda$	$\lambda_{trace}$	$\lambda_{95\%}_{trace}$	lag
España	$E_t - y_t$	0	1	0.123	21.371	15.495*	1
		1	0	0.00015	0.024	3.841	1
Portugal	$E_t - y_t$	0	1	0.5938	131.627	15.495*	1
		1	0	0.019	2.797	3.841	1

\* indica el rechazo de la hipótesis nula al 5%.

En la tabla siguiente (tabla 6.5) se recogen los resultados de las regresiones. Se ha estimado el modelo cuadrático, descartando un modelo cúbico que no dio resultados con significado económico. Se puede observar una alta significatividad de los parámetros estimados y un valor elevado del estadístico  $R^2$ , lo cual parece indicar que existe una representatividad aceptable del modelo utilizado. Por otro lado, en ambos casos los resultados son compatibles con la hipótesis de existencia de una EKC para España y Portugal. A la hora de calcular el punto donde las emisiones per cápita alcanzan el máximo, en España podemos apreciar que ese punto ya ha sido superado y que, por tanto, se encuentra en la fase decreciente de la curva. Sin embargo, Portugal se encuentra aún en su fase creciente, a gran distancia del máximo.

**Tabla 6.5:** Estimaciones de la existencia de una EKC (modelo cuadrático)

	España	Portugal
$\beta_0$	-69.080 (3.420)***	-22.676 (4.794)***
$\beta_1$	14.403 (0.777)***	4.132 (4.794)***
$\beta_2$	-0.731 (0.044)***	-0.171 (0.064)***
$R^2$	0.938	0.851
Akaike info criterion	0.847	1.402

Schwarz criterion	0.814	1.464
$y^{max}$	18.988,203€	176.640,407€

Entre paréntesis se encuentra el error estándar de los parámetros.

\*, \*\*, \*\*\* muestran si los parámetros son significativos al 90%, 95% o 99% de nivel de significación, respectivamente.

En los gráficos ofrecidos a continuación (figuras 6.4 y 6.5) se muestra la relación entre PIB per cápita y las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita. Además, se ofrece una proyección de la evolución de los años siguientes, utilizando como referencia la curva estimada a partir de la ecuación 3. Como hemos comentado anteriormente, las gráficas reflejan que España ya se encontraría en su fase decreciente; mientras que Portugal aún se sitúa en su fase creciente.

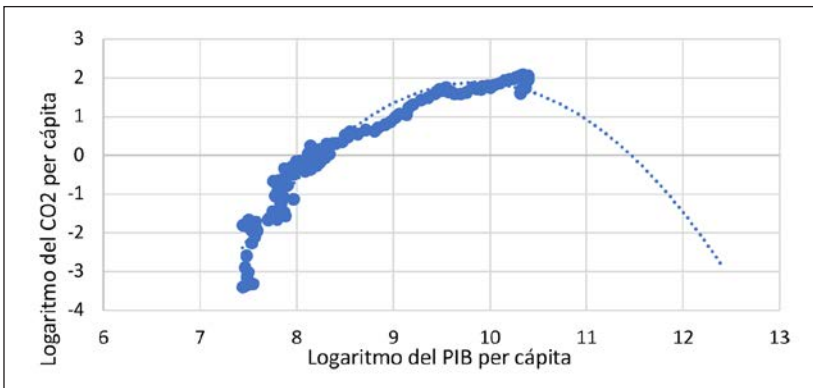


Figura 6.4. Relación entre emisiones y producto per cápita. España.

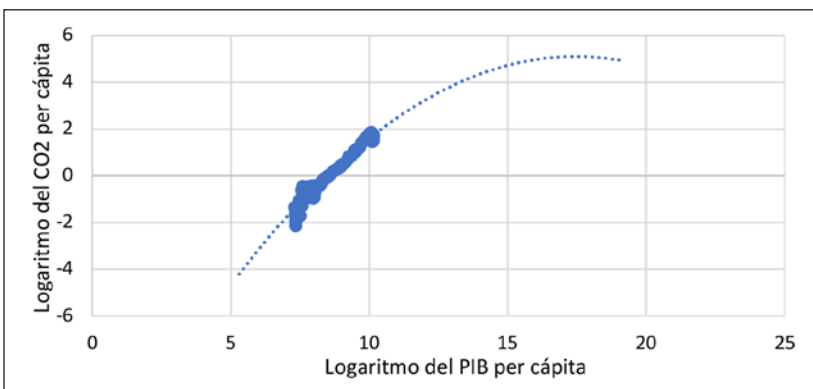


Figura 6.5. Relación entre emisiones y producto per cápita. Portugal.

Este ejercicio empírico se ha completado con un breve análisis basado en los datos de las comunidades autónomas españolas, para las cuales se dispone de una muestra más corta, entre los años 2000 y 2018. Esta limitación temporal se compensa con la disponibilidad de datos transversales amplios que proporcionarán un panel suficientemente grande para dar significatividad a los parámetros estimados. No obstante, la longitud temporal de la serie y la naturaleza de largo plazo del problema teórico que estamos analizando nos aconsejan tomar este ejercicio con cautela. Tomando como referencia lo establecido en el análisis con datos nacionales, al acortar la dimensión temporal y acumular los datos en el período más reciente, deberíamos encontrar un perfil de la curva más achatado y concentrado en la parte más elevada de la curva nacional. Es decir, concentrada en la parte en la que se alcanzó el máximo y se produjo el cambio en la pendiente.

La tabla 6.6 recoge los resultados obtenidos en la estimación de la EKC para las comunidades autónomas. Se ha realizado, al igual que en las estimaciones anteriores, a partir de la especificación de la EKC basada en la ecuación 3.

**Tabla 6.6.** Estimaciones de la existencia de una EKC mediante panel de las CC.AA. españolas

	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	R <sup>2</sup>
Modelo cuadrático	-395.911 (57.217)***	78.166 (11.419)***	-3.903 (0.569)***	0.117
$E_i = \beta_0 + \beta_1 \gamma_i + \beta_2 \gamma_i^2 + \varepsilon_i$				
$\gamma^{max}$	22.314,498			

Entre paréntesis se encuentra el error estándar de los parámetros.

\*, \*\*, \*\*\* muestran si los parámetros son significativos al 90 %, 95 % o 99 % de nivel de significación, respectivamente.

A la vista de estos resultados, se puede aceptar la hipótesis de existencia de una EKC. El cálculo de curvas específicas para cada comunidad no se ha realizado, puesto que la serie temporal resulta excesivamente corta para el planteamiento que subyace a la EKC. Sin embargo, a partir de la estimación realizada con el panel, sí se ha calculado un valor conjunto para el máximo y el

cambio de tendencia en la relación entre la degradación medioambiental y el PIB per cápita. El valor del punto máximo estaría aproximadamente en torno a un PIB per cápita de 22 314 €. Como puede observarse, este valor resulta coherente con el obtenido en las estimaciones realizadas con datos agregados. La figura 6.6 muestra gráficamente la relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> y el PIB per cápita de las comunidades autónomas. También se ofrece la curva estimada y la proyección de la evolución para los próximos años, siguiendo los parámetros de la ecuación 3. Como esperábamos *a priori*, la curva se concentra en torno al máximo estimado, presentando un perfil más achatado del que obtuvimos con la serie temporal agregada.

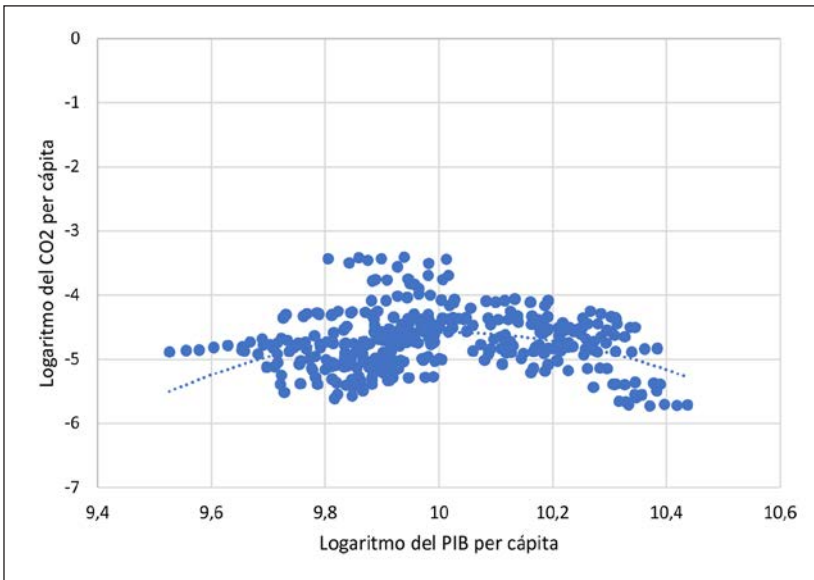


Figura 6.6. Relación entre emisiones y producto per cápita. Portugal.

## Conclusiones

Se ha estimado la relación entre la degradación medioambiental (medida a través de las emisiones de CO<sub>2</sub> per cápita) y el bienestar económico (medido a través del crecimiento del PIB real per cápita) para los casos de España y de Portugal. Estos dos países han experimentado en las últimas décadas un fuerte crecimiento econó-



mico que les ha acercado a niveles de renta (bienestar) de los países de la Unión Europea. Además, la incorporación a las estructuras de la UE les ha hecho implicarse en las iniciativas europeas de protección medioambiental. Concretamente, los países considerados han estado en la vanguardia europea en la transición energética hacia modelos más respetuosos con el medioambiente, basados en el fomento del consumo de energías procedentes de fuentes renovables.

Los resultados de las estimaciones muestran cierta evidencia compatible con la existencia de una EKC para cada país. Es decir, sí parece existir esa tendencia a reducir en etapas de cierto desarrollo económico la contaminación que va asociada al aumento de la producción y la renta de las etapas iniciales de crecimiento económico.

A partir de estos resultados, y teniendo presente las limitaciones del enfoque, que vienen ampliamente recogidas en la literatura, parece que se abre una línea de trabajo que permite ampliar y profundizar en los resultados obtenidos. Es especialmente prometedor el camino orientado al análisis basado en la incorporación de las energías renovables en ambos países. La apuesta por estas fuentes permite disminuir el impacto medioambiental de las economías, lo que reduce también el volumen de emisiones de CO<sub>2</sub> asociado al producto. Pero, además, el despliegue de las tecnologías asociadas a estas fuentes renovables puede producir efectos externos que modernicen ambas economías, generando ganancias en productividad y en empleo que, como señalan algunos autores (Pérez-Franco *et al.*, 2020), puede extenderse más allá del sector de la energía e impulsar el crecimiento y el empleo en el conjunto de la economía de los países. Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos, parece razonable incidir en el análisis para dar cobertura a medidas de política que fomenten y consoliden esta tendencia.

## Bibliografía

- Apergis, N. (2016). Environmental Kuznets curves: new evidence on both panel and country-level CO<sub>2</sub> emissions. *Energy Economics*, 54, 263-271.
- Balsalobre, D., Álvarez-Herránz, A., Olaya, A. y Cantos, J. M. (2016). *La curva medioambiental de Kuznets y la innovación energética en países de la OCDE*.

- Banco Mundial (2019). *Inflación. Índice de deflactor del PIB (% anual)* [base de datos]. <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.DEFL.KD.ZG>
- Boden, T., A., Marland, G. y Andres, R. J. (2017). *Global, regional, and national fossil-fuel CO<sub>2</sub> emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., USA. DOI: 10.3334/CDIAC/00001\_V2017.
- Bolt, J. y Van Zanden, J. L. (2020). *Maddison style estimates of the evolution of the world economy. A new 2020 update*. Maddison Project Database, version 2020.
- Correa, F., Vasco, A. F. y Pérez, C. (2005). La curva medioambiental de Kuznets: evidencia empírica para Colombia, Grupo de Economía Ambiental (GEA). *Semestre Económico*, 8 (15).
- Díaz-Vázquez, M. R. y Cancelo, M. T. (2009). Emisiones de CO<sub>2</sub> y azufre y crecimiento económico: ¿una curva de Kuznets ambiental? *Estudios Económicos Regionales y Sectoriales, EERS*, 9, 97-116.
- Dickey, D. y Fuller, W. (1979): Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74, 427-431.
- Ekins, P. (1997): The Kuznets curve for the environment and economic growth: Examining the evidence. *Environment and Planning A*, 29 (5), 805-830.
- García, A., García-Álvarez, M. T. y Moreno, B. (2017). Iberian electricity sector. A transition towards a more liberalized and sustainable market. *GDAE Working*, 17-01. Global Development And Environment Institute. Tufts University, Medford, MA.
- Grossman, G. M. y Krueger, A. B. (1991). Environmental impact of a North American Free Trade Agreement. *NBER Working Paper* 3914.
- Holtz-Eakin, D. y Selden, T. M. (1995). Stoking the fires? CO<sub>2</sub> emissions and economic growth. *J. Public Econ*, 57, 85-101.
- Instituto Nacional de Estadística (2020). *Contabilidad regional de España*. [https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica\\_C&cid=1254736167628&menu=resultados&idp=1254735576581#!tabs-1254736158133](https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736167628&menu=resultados&idp=1254735576581#!tabs-1254736158133)
- Jaunky, V. C. (2011). The CO<sub>2</sub> emissions-income nexus: evidence from rich countries. *Energy Policy*, 39 (3), 1228-1240.
- Johansen, S. (1991). Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in gaussian vector autoregressive models. *Econometrica*, 59 (6), 1551-1580.

- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, 45 (1), 1-28.
- Lennox, E., Harris, J. M. y Codur, A. M. (2019). *Macroeconomics and the environment*. Global Development And Environment Institute. Tufts University, Medford, MA.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2020). *Datos de emisiones de GEI desagregados por CCAA. Serie 1990-2018*. [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/emisionesgeiporccaaserie1990-2018\\_tcm30-508282.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/emisionesgeiporccaaserie1990-2018_tcm30-508282.pdf)
- Özokcu, S. y Özdemir, Ö. (2017). Economic growth, energy, and environmental Kuznets curve. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 639-647.
- Panayotou, T. (1993). *Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development*. ILO Working Papers 992927783402676, International Labour Organization.
- Pérez-Franco, I., García, A. y Maldonado, J. J. (2020). Energy transition towards a greener and more competitive economy: the Iberian case. *Sustainability*, 12, 3343. DOI:10.3390/su12083343.
- Prados de la Escosura, L. (2017). *Spanish economic growth* (pp. 1850-2015). Londres: Palgrave MacMillan.
- Reinhard, P. (2005). Granger's representation theorem: a closed-form expression for I (1) processes. *The Econometrics Journal*, 8 (1), 23-38, <https://doi.org/10.1111/j.1368-423X.2005.00149.x>
- Shafik, N. y Bandyopadhyay, S. (1992). *Economic growth and environmental quality: time-series and cross-country evidence*. World Bank Publications.
- Tamarit, C. (2011). *¿Existe una curva Kuznets para las emisiones de CO<sub>2</sub> en el caso de España? Informe estratégico de la fundación para la sostenibilidad energética y ambiental*. Barcelona: FUNSEAM, Fundación para la Sostenibilidad Energética y Ambiental.



# Hidrocarbonización. De promesa a escala laboratorio a realidad industrial

*Hydrocarbonization. From lab scale promise to industrial reality*

JUAN FÉLIX GONZÁLEZ GONZÁLEZ  
BEATRIZ LEDESMA CANO  
Escuela de Ingenierías Industriales,  
Universidad de Extremadura, Badajoz

SILVIA ROMÁN SUERO  
Escuela de Ingenierías Industriales,  
Universidad de Extremadura, Badajoz  
sroman@unex.es

## Resumen

En un contexto de transición de las tecnologías termoquímicas destinadas al aprovechamiento de biomasa, la hidrocarbonización se ha establecido en la última década como una técnica prometedora para transformar materiales biomásicos lignocelulósicos, recursos biomásicos húmedos de difícil uso mediante otras técnicas y más recientemente otros residuos sólidos no biomásicos, en materiales carbonosos aptos como combustible o como materiales funcionales con propiedades específicas, diseñadas para satisfacer diversas aplicaciones.

El presente trabajo pretende mostrar las actuales plantas de hidrocarbonización, a diferente escala, que se han puesto en marcha recientemente en diferentes partes del mundo. El análisis comprende las tecnologías que utilizan, los materiales de entrada y los productos que se obtienen, así como las aplicaciones de los mismos y sus salidas en el mercado.

**Palabras clave:** hidrocarbonización, residuos biomásicos, bio-refinería.

## Abstract

In a context of transition of the thermochemical technologies devoted to the use of biomass, hidrocarbonization has established as a promising technique to transform high humidity biomass resources, and more recently, other biomass resources, into carbón materials suitable as fuels or as functional materials with specific properties, sedigned to satisfy particular applications.

The present work aims to describe the current hydrothermal carboization plants, at different scales, that have been recently implemented in different parts of the world. The analysis involves the technologies used, the inlet materials and the products obtained, as well as the applications and their place in the market.

**Keywords:** hidrocarbonization, biomass waste, bio-refinery.

## El momento actual de transición energética

El creciente compromiso por parte de los gobiernos, en los niveles regional, nacional e internacional, de establecer medidas decisivas para apostar por una transformación del paradigma energético actual atiende a diversas razones. De una parte, está el severo problema medioambiental al que nos enfrentamos, que incluye los efectos de los gases de efecto invernadero sobre la temperatura del planeta, así como la emisión de otros contaminantes, que generan enfermedades en los seres vivos, modificaciones en los ecosistemas, y efectos migratorios devastadores que incrementan la pobreza y avivan tensiones políticas entre países. De otro, la aplastante realidad del carácter finito de los combustibles fósiles (aún con una participación del 85 % en la distribución de energía primaria, a nivel mundial), y las consecuencias de dependencia entre países, con sus correspondientes conflictos geopolíticos. Asimismo, el progresivo aumento de la población y la modernización de las potencias emergentes que hacen necesaria la búsqueda de alternativas energéticas.

Las razones expuestas han propiciado la aparición de importantes acuerdos a diferentes niveles. Así, a nivel internacional, la actual directiva sobre energías renovables [1] establece que, para 2020, un 20 % del consumo de energía en la Unión ha de proceder de fuentes renovables, al tiempo que las emisiones de efecto invernadero deben disminuir un 20 % con respecto a los niveles de 1990, y se deben aumentar en un 20 % la eficiencia

energética. Además, la Directiva sobre Energía Renovable (UE) 2018/2001 establece un objetivo obligatorio para la UE de al menos el 32 % de aporte de energías renovables para 2030, con una revisión del mismo para aumentar esta cifra en 2023 [2]. En la misma línea, la Comisión Europea ha anunciado el pasado año su compromiso con el European Green Deal para convertirse en el primer continente climatológicamente neutral en 2050. Igualmente, la iniciativa de Economía Verde y Circular del Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente define como estratégica la investigación en fuentes no fósiles de energía y promueve la optimización de recursos. También en el seno de la ONU, los Objetivos de Desarrollo Sostenible incluyen, en particular en el número 7, fomentar la «energía asequible y no contaminante».

En España, la reciente «Estrategia española de economía verde y circular» defiende una utilización más reciente y sostenible de los productos, subproductos y residuos que generan los sectores que explotan los recursos biológicos (como el agrario, alimentario o forestal). En cuanto a Extremadura, la Estrategia RIS3 ha señalado como oportunidad de la región la implementación de modos más eficientes de gestionar los residuos de las industrias alimentarias para la producción de materiales de alto valor añadido.

Es bien conocido que la biomasa podría desempeñar un papel relevante en la consecución de los objetivos promovidos por las estrategias descritas anteriormente, como una alternativa atractiva como fuente de biocombustibles o productos de valor añadido. Además de ser renovable, abundante, y descentralizada, produce bajas emisiones netas de CO<sub>2</sub> y su contenido en azufre es bajo. Asimismo, en muchos casos, su acumulación puede representar un problema económico y medioambiental, y su uso no solamente podría ser una solución, sino que además puede suponer un beneficio económico. Por este motivo, el desarrollo de procedimientos que permitan transformar la biomasa en productos útiles como portadores de energía eficientes, depósitos para secuestro de carbono o producción de biocombustibles supone un reto muy atractivo en nuestros días.

## La tecnología. La hidrocarbonización

La conversión termoquímica de la biomasa, mediante procesos de combustión, pirolisis y gasificación para la producción de energía, biocombustibles o productos de alto valor añadido requiere utilizar biomazas con bajo contenido de humedad (< 10-15 %). En estos casos se requiere un proceso de secado previo bastante costoso en general, que puede llegar a hacer inviable el proyecto desde el punto de vista económico.

Existen actualmente numerosos residuos sólidos húmedos que se generan en instalaciones agroindustriales, por ejemplo, como residuos de invernaderos, lodos de depuradoras, alperujos de almazaras, pieles y semillas de la industria del tomate u otros frutales, etc., y también especies invasivas con elevada tasa de crecimiento que suponen un problema severo en la región, para los que se requiere buscar vías de eliminación o transformación debido a que causan problemas medioambientales graves, con grandes repercusiones económicas.

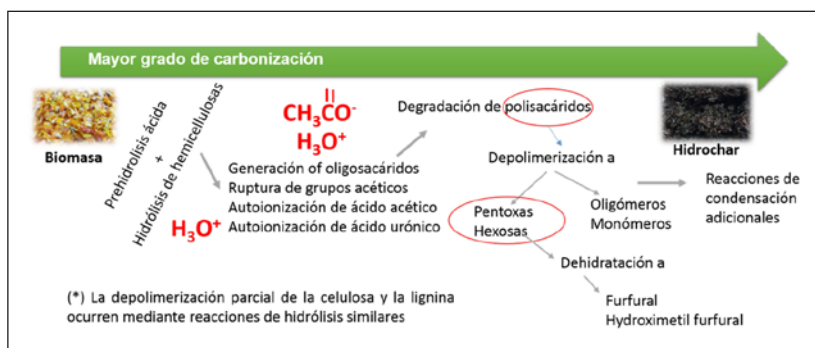
El aprovechamiento de este tipo de residuos puede ser abordado con un proceso de carbonización hidrotérmica. Mediante este tratamiento, la biomasa se calienta a temperaturas moderadas (180-250 °C) en presencia de agua, bajo condiciones autógenas, en algunos casos en presencia de sustancias químicas [3], para producir una fracción carbonosa llamada hidrocarbonizado o hidrochar (HC), que es más estable microbiológicamente que la materia prima, y posee un mayor contenido en C (y en consecuencia, mayor poder calorífico), así como contenidos variables y controlables de otros elementos de interés.

De forma general, la base del proceso es el hecho de que el agua, en condiciones de elevada temperatura y presión, tiene la capacidad de romper la estructura fibrosa de la biomasa y eliminar los grupos funcionales oxigenados. La consecuencia inmediata, además del aumento en C (por eliminación fundamentalmente de H y O) es la mayor hidrofobicidad y mayor facilidad para triturar. El agua tiene este poder debido al cambio en su constante dieléctrica, bajo estas condiciones, que la hace apta para disolver sustancias no polares [4], como gran parte de los compuestos orgánicos constituyentes de la biomasa. Así, el valor de dicha constante en condiciones normales ( $\epsilon = 78.5$ ) disminuye con la temperatura ( $\epsilon = 44$  a 150 °C,  $\epsilon = 35$  a 200 °C y  $\epsilon = 27$



a 250 °C), hasta un valor similar al correspondiente para solventes orgánicos (para el metanol  $\epsilon$  es 33 a 25 °C). Del mismo modo, temperaturas en el rango 200-280 °C confieren al agua un elevado valor de producto iónico, debido a lo cual la misma se disocia fácilmente en  $\text{OH}^-$  y  $\text{H}_3\text{O}^+$ , de catalizando el proceso como base o ácido [5].

De acuerdo con las investigaciones realizadas, el proceso de HTC comienza con la ruptura de los enlaces heterocíclicos de la hemicelulosa, que ocurre a temperaturas tan bajas como los 150 °C, y eventualmente terminará con el consumo total de la hemicelulosa [6]. Tiene lugar, así, un proceso de autoionización del agua, y el pH comienza a disminuir, lo que provoca una cascada de reacciones de deshidratación, descarboxilación, aromatisación y recondensación, como aparece recogido en la figura 7.1.



**Figura 7.1.** Reacciones que tienen lugar durante la HTC de la biomasa. Elaboración propia [7].

Este proceso conduce a la generación de oligosacáridos, así como a la división de los grupos aceto que también ionizan, y, por tanto, se producen más iones hidronio. Si las condiciones de HTC son adecuadas, se llevarán a cabo varias reacciones de depolimerización; por ejemplo, los polisacáridos se deshidratarán a furfural e hidroximetilfurfural, respectivamente. Estos dos compuestos han despertado gran interés en la industria química, por su creciente valor en el mercado, así como el ácido levulínico. En particular, el furfural se genera a partir pentosas, tales como xilosa y ribosa, mientras que el HMF se construye a partir de glucosas, tales como fructosa y manosa. Con el aumento del tiempo de residencia en el medio acuoso, el HMF se descompo-

ne sucesivamente a ácido levulínico y ácido fórmico, estando el proceso muy condicionado por el pH [8, 9].

Finalmente, otros constituyentes de la biomasa (celulosa y lignina) se descomponen mediante reacciones similares, a pesar de que son más difíciles de degradar y requieren condiciones más severas, en comparación con la hemicelulosa. Estas reacciones suelen ser simultáneas, por lo que añaden más complejidad a todo el proceso [6].

Por su simplicidad y bajo coste, los procesos de HTC han ganado gran prominencia sobre otros tratamientos previos de biomasa. Por otra parte, hay que señalar que el balance energético del proceso es muy favorable. El hecho de que la biomasa no necesite secarse permite ahorrar una gran cantidad de energía (la entalpía de vaporización del agua es igual a 2258 kJ/kg a 1 bar), que se suministraría necesariamente en un proceso de pirólisis. Además, en global, el proceso es exotérmico, a diferencia de la pirólisis. Finalmente, dado que la emisión de compuestos gaseosos es mínima (la reacción transcurre en un recipiente cerrado y el CO<sub>2</sub> vuelve al seno acuoso para tomar parte en las reacciones), la eficiencia de fijación de carbono es óptima.

Si bien el tratamiento hidrotérmico de sustancias orgánicas fue estudiado a principios del siglo XX con el objeto de comprender el proceso natural de coalificación, permitiendo la obtención del Premio Nobel a Bergius en 1914 [10], muy recientemente se ha despertado el interés de este proceso, con miras al residuo sólido al que da lugar, que se contempla bien como combustible, o bien como precursor para producir materiales de carbono (hidrochars, microesferas y carbones activados) [3]. Las ventajas de este proceso con respecto a los tradicionales son muy numerosas; en particular, destacan las siguientes:

- Puesto que el agua es el agente reactivo en el proceso, un elevado contenido en humedad no supone un inconveniente, no es necesario el secado previo de la biomasa.
- La densificación energética mediante pirólisis (carbonización) conlleva el empleo de elevadas temperaturas, en el rango 600-1000 °C, además del gasto del agente gaseoso inerte necesario y la indeseable producción de alquitrán que causa innumerables problemas de degradación y corrosión de la instalación, y la generación de gases, que, en ocasiones y en función

de la composición del precursor, pueden ser tóxicos. Por el contrario, la hidrocarbonización utiliza un rango de temperaturas menor (180-240 °C), solo necesita como reactivo agua y genera una cantidad muy pequeña de gases (< 5 % en peso).

- Se puede procesar cualquier tipo de biomasa, tanto húmeda como seca, incluso mezclas. Esto ha sido demostrado a escala laboratorio y también en las plantas industriales ya existentes en el mundo, que mezclan biomásas lignocelulósicas, fangos de depuradoras y residuos sólidos urbanos.
- El carbón producido es de emisión neutra de CO<sub>2</sub>, almacenable, con un alto contenido energético. Además, la presencia de aglomerantes naturales hace que sea fácil de peletizar para mejorar su logística posterior. Diversos usos han sido probados para los hidrochars, desde el empleo como combustible, precursor para producción de syn-gas [11], o fertilizante [12], hasta usos más exigentes y que requieren etapas de procesamiento posteriores, como adsorbente, aditivo en materiales de construcción para mejorar aislamiento térmico o acústico, soporte para reacciones catalíticas, o material de electrodo, una vez la porosidad y la funcionalidad superficial se diseñan durante su preparación [3].
- El agua de procesado puede ser utilizada como fertilizante o para potenciar la producción de metano en plantas de digestión anaerobia. También se ha propuesto la extracción de químicos de elevado interés en la industria química, como el 5-hidroximetilfurfural o ácido levulínico [8, 9].

## Apuestas a escala industrial de la hidrocarbonización

Las ventajas citadas demuestran la pertinencia de dirigir el interés hacia la técnica de HTC. Con un aumento exponencial de trabajos de investigación en la última década, algunos inversores han apostado por la técnica a escala semindustrial e industrial, en varios lugares del mundo. Así, en los últimos años cada planta de HTC ha sido diseñada siguiendo patentes diferentes y muestran diferencias en cuanto a los precursores que emplean, las condiciones, la capacidad de procesado e incluso en los usos

que dan a los productos obtenidos. Cada una de ellas es un ejemplo y supone un impulso hacia la implementación de esta técnica y su creciente protagonismo en el paradigma de uso de la biomasa tradicional.

Las plantas ya existentes en algunos emplazamientos del mundo son una prueba de la efectividad del método para tratar biomásas con humedades superiores al 90%, con configuraciones variadas y con rentabilidades que dependen de la escala y del uso posterior de los productos generados. Permiten una alternativa al compostaje o almacenaje a cielo abierto de este tipo de residuos, que finalmente derivaría en generación de emisiones de efecto invernadero a la atmósfera, sin ningún aprovechamiento de su valor.

La compañía **INGELIA** opera en dos plantas en Valencia (España) y otra en Nottingham (Reino Unido). El procedimiento patentado de esta empresa se basa en la escalabilidad del proceso en función de la demanda del cliente. La tecnología modular permite diseñar las plantas según la cantidad disponible de material precursor, lo que facilita su operación y mantenimiento.

A partir de diversos tipos de biomasa húmeda, produce carbón y fertilizantes líquidos. Entre los precursores con los que ha trabajado, con contenidos de humedad entre el 30 y el 90%, está la fracción orgánica de las plantas de tratamiento de agua, lodos de depuradora, residuos agroforestales y residuos de industrias de comida y bebida, con una alimentación de hasta 70 000 toneladas de biomasa al año. Además, en la planta se ha proyectado una caldera que quema parte del hidrochar que generan; de este modo, cubren las necesidades térmicas del propio reactor. Esta y otras mejoras han sido recogidas recientemente en el Proyecto NewApp, concedido a la compañía. Se ha evitado el uso de gasóleo (unos 12 000 litros de gasóleo), equivalentes a 430 GJ y se han reducido los costes de operación. Se ha evitado además la emisión de 32 toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Entre las biomásas que han utilizado, pueden producir un carbón con un poder calorífico en torno a 24 MJ/kg (similar al del carbón vegetal) y un contenido en carbono entre el 54 y el 62%, que cumple los estándares europeos (EN-14961-6) para biocombustibles sólidos. La producción de hidrochar se sitúa en torno a unas 2500 ton/año; las estimaciones de esta empresa sitúan el *payback* de la inversión en torno a 6,5 años.

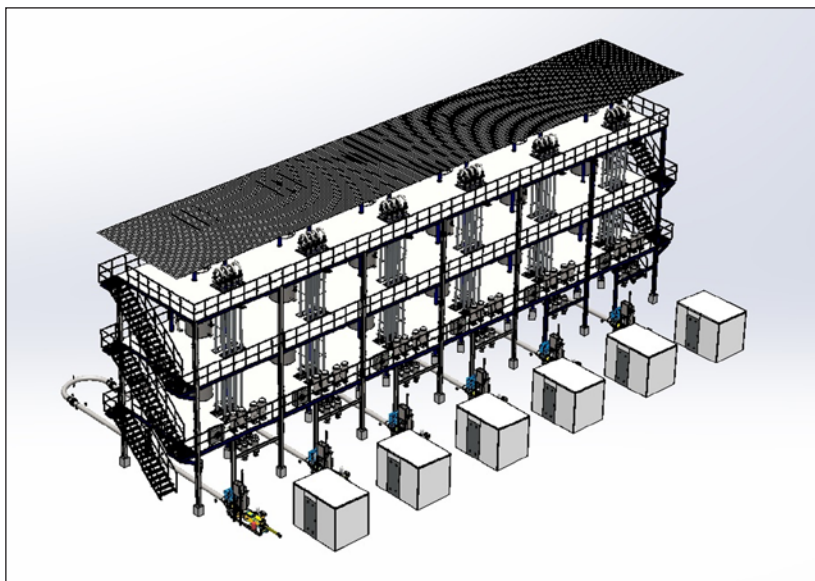


Figura 7.2. Planta modular de HTC de INGELIA, Valencia.

La planta de SUNCOAL, en Berlín, opera con distintos *inputs* (biomasas, lodos de depuradora...); obtiene, entre otros productos: biocarbón para ser utilizado como combustible, carbones de elevadas prestaciones para ser usados como carbón activo o en almacenamiento de energía en baterías y bioproductos químicos de elevado interés en el mercado. SUNCOAL participa en actividades de I+D con empresas-clientes que utilizan los productos antes mencionados en sus procesos con la intención de mejorar el funcionamiento de los mismos. Además, la planta, con tecnología patentada, permite, al igual que la de INGELIA, trabajar en diferentes escalas y adaptarse a las necesidades del cliente en cada momento.

El hidrochar que produce SUNCOAL tiene un precio de 250 dólares/ton. Además de comercializarse, este carbón está siendo alimentado actualmente a una planta de gasificación en Munich; produce una potencia de aproximadamente 2 MW de electricidad. También produce gas a partir del hidrochar rico en H<sub>2</sub> y CO, que se emplea en motores de gas. Este gas es de mejor calidad que el obtenido en una planta de gasificación de biomasa, porque minimiza la formación de indeseables alquitranes.

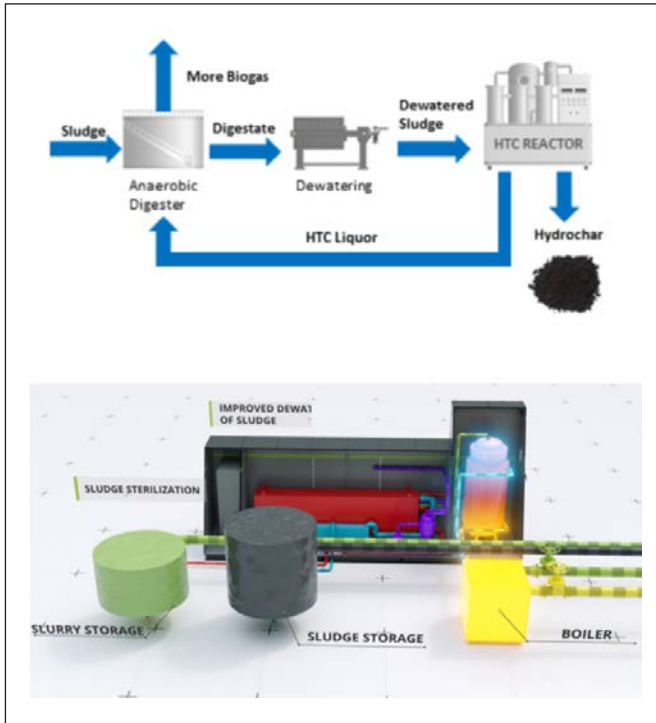
La **compañía C-green** ha construido una planta HTC en Heinola, Finlandia, que está operativa desde enero del 2020. La planta utiliza residuos húmedos de la industria papelera para transformarlo en carbón combustible, con una capacidad de 10 toneladas de residuo por hora. Para el tratamiento de la fase líquida utiliza oxidación húmeda, de donde viene el nombre de su tecnología: Oxypower HTC.

La empresa **TerraNova** desarrolla distintos proyectos HTC aplicados fundamentalmente a lodos de depuradora en Kaiserslautern (Alemania), Jinjin (China) y Eslovenia. En funcionamiento desde finales del 2016, ha recibido varios premios en cuanto a innovación y gestión eficiente de residuos. Los proyectos utilizan residuos procedentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales: un producto sometido a los crecientes estándares de descontaminación debido a su toxicidad, y de difícil tratamiento por métodos termoquímicos convencionales (de elevado coste), aunque con un enorme potencial de recuperación de nutrientes. En TerraNova han registrado una tecnología de HTC exclusiva, especialmente focalizada hacia la recuperación de fósforo en el agua del proceso, para su uso como fertilizante en forma de gránulos aptos para su uso directo en suelos. Este potencial en nutrientes no es aprovechado por los métodos convencionales empleados hasta ahora para este tipo de residuos. Es interesante resaltar que, en comparación con los procesos empleados hasta la fecha para secar los lodos de depuradora, la metodología TerraNova supone un ahorro del 80 % en demanda energética. Aparte de eso, el contenido en carbono del material (mayor al 65 %) lo hace apto para su uso como combustible sólido, y el agua, una vez tratada para obtener los nutrientes, sirve para producir biogás.



**Figura 7.3.** Planta de HTC Terranova en Jinjin, China.

**Carborem** es una compañía italiana localizada en Trento, dedicada a la reducción y valorización de digestatos procedentes de la biodigestión de lodos de depuradora. La empresa construyó su planta HTC compacta y modular (llamada C700) en 2019 y ha comenzado su operación en enero de 2020 y ha mostrado un significativo aumento en la eficiencia.



**Figura 7.4.** Planta de Biodigestión-HTC Carborem en Trento, Italia.

La planta tiene una capacidad de procesamiento de 12 000 toneladas de lodos al año, y el módulo C700, operando a 200 °C y 20 bar, lo transforma en menos de 60 minutos en un líquido apto para la producción de biogás, y en un hidrochar que se emplea en la misma planta como combustible, o como enmienda en suelos.

HTCycle es una compañía suiza, líder en el desarrollo de aplicaciones industriales de procesos HTC, fundada en 2009 (hasta el 2017 su nombre era AVA-CO2). Posee dos plantas, una a escala piloto (HTC-0), ubicada en Karlsruhe (Alemania) que opera

con residuo de cerveza (40 000 ton/año), y otra a escala comercial, ubicada en Relzow (Alemania), que opera desde el año 2017, utilizando lodos de depuradora. De forma similar a TerraNova, logran ahorros muy significativos respecto a procesos tradicionales de tratamiento de estos residuos, y son capaces de recuperar más del 90% del carbono de los mismos. Esto garantiza que el hidrochar resultante sea un material carbonoso de calidad para su uso como combustible o para producir carbón activo, con valor en el mercado, además del fósforo, cuya recuperación permite preparar fertilizantes. La compañía HTC-Cycle, además, consigue reciclar en el proceso productivo parte del agua utilizada durante el proceso, con la doble ventaja del ahorro en agua y recuperación del calor de esta.



Figura 7.5. Planta HTC-Cycle, en Relzow, Alemania.

Finalmente, **Antaco**, situada en Surrey, Inglaterra, convierte residuos orgánicos diversos (fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, residuos de jardinería, pieles de naranja, algas, residuos de café, champiñones...) en carbón para su uso como briquetas o pellets.

## Conclusiones

La técnica de hidrocarbonización representa una apuesta de proceso de conversión termoquímica de biomasa que ya muestra una participación creciente, a escala industrial y bajo diferentes configuraciones y tamaños. Las plantas ya en funcionamiento en diferentes lugares del mundo emplean diferentes precursores de partida e implementan diversas modificaciones a lo largo del proceso, que determinan la tipología de los productos a obtener. El presente trabajo hace una revisión de las compañías que han adoptado la tecnología y demuestra la interesante flexibilidad bajo la que se pueden diseñar las mismas.



## Referencias

- [1] Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.
- [2] Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.
- [3] S. Román, J., Libra, N., Berge, E., Sabio, K., Ro, L., Li, B., Ledesma, A., Álvarez, S. (2018). Bae. Hydrothermal carbonization: modeling, final properties design and applications: a review. *Energies*, 11, 216-254.
- [4] Peterson, A. A., Vogel, F., Lachance, R. P., Fröling, M., Antal, M. J., Tester, J. y Tester, J. W. (2008). Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: a review of sub- and supercritical water technologies. *Energy Environ. Sci.*, 1, 32-65.
- [5] Reza, M. T., Yan, W., Uddin, M. H., Lynam, J. G., Hoekman, S. K., Coronella, C. J. y Vásquez, V. R. (2013). Reaction kinetics of hydrothermal carbonization of loblolly pine. *Bioresource Technology*, 139, 161-169.
- [6] Carrasco, J. E., Saiz, M. C., Navarro, A., Soriano, P., Saez, F. y Martínez, J. M. (1994). Effects of dilute acid and steam pretreatments on the cellulose structure and kinetics of cellulosic fraction hydrolysis by dilute acids in lignocellulosic materials. *Applied Biochem. Biotechnol.*, 45, 23-34.
- [7] Sabio, E., Álvarez-Murillo, A., Román, S., Ledesma, B. (2016). Conversion of tomato-peel waste into solid fuel by hydrothermal carbonization: influence of the processing variables. *Waste Manag.*, 47, 122-132.
- [8] Asghari, F. S., Yoshida, H. (2007). Kinetics of the decomposition of fructose catalyzed by hydrochloric acid in subcritical water: formation of 5-hydroxymethylfurfural, levulinic, and formic acids. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 46, 7703-7710.
- [9] Kim, B., Yang, J., Kim, M. y Lee, J. W. (2020). One-pot selective production of levulinic acid and formic acid from spent coffee grounds in a catalyst-free biphasic system. *Bioresour. Technol.*, 303, 122898.
- [10] Bergius, F. (1932). Chemical reactions under high pressure. *Nobel Lecture*, May 21.
- [11] Álvarez, A., Román, S., Ledesma, B. y Sabio, E. (2015). Study of

variables in energy densification of olive stone by hydrothermal carbonization. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 113, 307-314.

- [12] Puccini, M., Ceccarini, L., Antichi, D., Seggiani, M., Tavarini, S., Hernandez, M. y Vitolo, S. (2018). Hydrothermal carbonization of municipal woody and herbaceous prunings: hydrochar valorisation as soil amendment and growth medium for horticulture. *Sustainability*, 10, 846.

# Realidad virtual para formación, divulgación y gestión de instalaciones de depuración de aguas residuales

Virtual reality for teaching, knowledge spreading  
and management of wastewater treatment plants

MARCOS GARRIDO HERRERA

Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura

PEDRO TOMÁS MARTÍN DE LA VEGA MANZANO

Consorcio para la Gestión de los Servicios  
Medioambientales de la provincia de Badajoz

MIGUEL ÁNGEL JARAMILLO MORÁN

FÁTIMA FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

DIEGO CARMONA FERNÁNDEZ

Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura

MARÍA ISABEL FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

Consorcio para la Gestión de los Servicios  
Medioambientales de la Provincia de Badajoz

## Introducción

En la actualidad, el Plan Nacional de Depuración Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización (Plan DSEAR) [1] de la Secretaría de Estado de Medioambiente, dependiente del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, recoge la totalidad de actuaciones pendientes para alcanzar el objetivo medioambiental relacionado con la consecución del buen esta-

do del 100% de las masas de agua del Estado español en la fecha límite de 2027 establecida por la Directiva Marco del Agua [2]. En este sentido, teniendo en cuenta que ninguna de las cuencas hidrográficas españolas alcanza este objetivo, tal como establece el plan antes comentado, se dibuja un escenario en el que se acometerán un amplio número de actuaciones de inversión, en concreto 4246, muy centradas en dotar de infraestructuras de depuración a los núcleos que a día de hoy no depuran sus aguas, puesto que la contaminación urbana se ha identificado como uno de los temas prioritarios en los estudios previos de planificación del tercer ciclo hidrológico, el cual abarcará de 2021 a 2027 [3].

Del total de medidas que cabe acometer en el ámbito de la depuración de aguas residuales urbanas en el siguiente ciclo de planificación hidrológica, en torno al 80% de las mismas se basará en dotar de infraestructuras de depuración a pequeños municipios, ya que para las grandes y medianas aglomeraciones urbanas se han ido cumpliendo los preceptos de la directiva 91/271/CEE en los últimos 30 años [4], la cual establecía unos requisitos depurativos para estos núcleos de población, mientras que para los pequeños, únicamente establece que se les aplique un tratamiento adecuado, sin definir unos valores límites de calidad para sus aguas, siendo esta la causa de que las pequeñas poblaciones hayan sido las últimas en ser consideradas en los planes de infraestructuras.

Así, el horizonte depurativo pasa por la construcción de un amplio número de estaciones de depuración, si bien, tal como se apunta en el Informe de la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS) [5], la inversión en infraestructuras supone un incremento del patrimonio hidráulico. Dicho patrimonio igualmente requiere una inversión en renovación y mantenimiento que asegure el buen desempeño y funcionamiento de las actividades que lleva asociadas, que no son otras que la de suministrar agua y mantener las reservas de la misma en buenas condiciones, identificándose un problema endémico del patrimonio hidráulico nacional, como es que la inversión en nuevas infraestructuras sí queda sustentada en gran medida por los fondos europeos, mientras que la renovación de las mismas sufre un fuerte déficit, puesto que la tasa de renovación se sustenta en una pequeña fracción de la tarifa de los usuarios y las

acciones de mantenimiento de los operadores de dichas infraestructuras. Se calcula a día de hoy un déficit en torno al 60% de las necesidades de reinversión y renovación, lo cual pone en riesgo la vida útil del patrimonio hidráulico. Por tanto, las medidas de inversión que se acometerán en la próxima década requieren tomar acciones sobre la mejora en la renovación y mantenimiento del patrimonio hidráulico para garantizar la sostenibilidad de las infraestructuras hidráulicas en su vida útil.

Así, y como ya se identifica en el «Informe de nuevas oportunidades basadas en la inversión en I+D+i en el sector del agua en Extremadura» [6], dotar de nuevas estaciones de depuración a los pequeños núcleos requiere el diseño de sistemas sostenibles, con bajos costes de mantenimiento y mínima huella de carbono, con objeto de reducir la tasa de mantenimiento del patrimonio hidráulico. Por tanto, ante este escenario, las tecnologías depurativas actuales tienden a absorber las ventajas de las tecnologías extensivas, que son aquellas que imitan a la naturaleza, y combinarlas con tecnologías intensivas de bajo coste, que pasan por los tratamientos anaerobios, por haber demostrado buenos rendimientos depurativos, tal como establece [7], y por presentar un menor número de elementos que requieren una renovación y una fuerte reinversión para mantener su vida útil, a diferencia de las clásicas estaciones de depuración basadas en procesos de aireación prolongada que ya se han implantado en medianas y grandes poblaciones, las cuales implementan un amplio número de elementos con fuertes necesidades de mantenimiento y renovación.

En este contexto, queda de manifiesto que la revolución tecnológica en depuración de aguas residuales es patente, puesto que se construirán un amplio número de estaciones depuradoras, principalmente para pequeños núcleos, y que, por tanto, se requiere comenzar a divulgar y dar formación a los técnicos del sector para afrontar los nuevos retos depurativos que se plantean en la presente década. En ese sentido, en el presente trabajo se presenta un modelo desarrollado en realidad virtual de una planta depuradora basado en el modelado de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) del Centro de Cirugía de Mínima Invasión (CCMIJU) de Cáceres, la cual integra una hibridación de tecnologías, basada en un tratamiento principal con humedales artificiales, reforzado con un reactor anaerobio

hidrolítico de flujo ascendente. Se ha generado un modelo tridimensional de lo que serán las futuras estaciones de depuración de aguas residuales para pequeños núcleos, basado en la infraestructura del CCMIJU por haber sido esta objeto de investigación y análisis de sus resultados depurativos, y se muestran unos rendimientos óptimos y aceptables por la normativa vigente [7]. El modelo ha sido diseñado con dos objetivos principales: por un lado, uno con una orientación más tecnológica que busca dar a conocer los preceptos de hibridación de tecnologías, explicando los procesos que se desarrollan en la planta y sus ventajas, y por otro lado, un objetivo más formativo, es decir, el desarrollo de un modelo interactivo en el que los usuarios objetivos sean los futuros diseñadores y operadores de este tipo de tecnología.

El modelo desarrollado permitirá al usuario interactuar con los distintos elementos de la propia instalación, incluyendo paneles explicativos con audio y vídeo de los procesos depurativos, donde se insertan secciones que facilitan el estudio de los flujos de aguas residuales, lo que permite accionar los elementos de la planta, da libertad de movimiento sobre la instalación y acceso por las diferentes casetas, y permite levantar tapas de arquetas, abrir y cerrar válvulas y realizar todas aquellas acciones que sean factibles en la propia depuradora a nivel real. Así, con este modelo en realidad virtual se podrá realizar una labor divulgativa de las nuevas tecnologías implementadas, dar formación a futuros técnicos e incluso testear modificaciones al diseño de la EDAR de forma práctica, no invasiva y de fácil acceso tanto para el mundo académico como para el sector del agua; se generará, por lo tanto, una herramienta que permite facilitar formación especializada previamente al diseño, construcción y gestión de las nuevas EDAR del futuro. En este caso, los paquetes de software empleados han sido 3DS Max para el modelado de objetos y Unity para la creación del entorno virtual, mientras que para las acciones de realidad virtual, se ha empleado un visor Oculus Rift S, el cual no necesita sensores externos, al venir integrados en el propio visor, siendo de fácil acceso en el mercado y a precios muy asequibles.



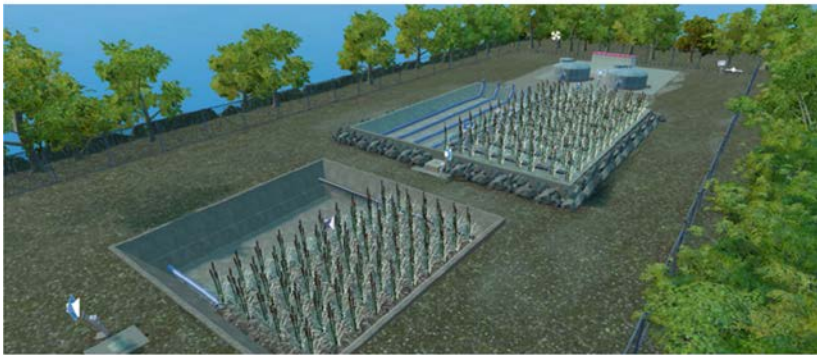
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 8.1.** (a) Interior de la caseta de pretratamiento real, en el que se observa el tamiz vertical de tratamiento de fino en la parte izquierda de la foto y el pozo de bombeo en la parte derecha. (b) Representación de la caseta de pretratamiento en el modelo digital. (c) Panorámica de la instalación real, en la que se observan los lechos de los humedales. (d) Representación digital de la panorámica anterior, tal como se presenta en el modelo.

## Materiales y métodos

Para la construcción del modelo digital se ha partido de la revisión del proyecto de construcción de la instalación depurativa identificando en los planos de dicho proyecto las principales medidas constructivas desarrolladas para generar el modelo digital. A partir de ahí, se han verificado las medidas obtenidas de los planos en la propia instalación real; este proceso se ha acompañado de un reportaje fotográfico de los detalles, los cuales serán incluidos en el modelo para aportar el mayor realismo posible.

Basándose en toda la información recopilada, se desarrolló el modelo de la planta mediante el software 3DS Max para los objetos y el software Unity para el modelado de los entornos virtuales, tal como se puede apreciar en la figura 8.1 (a) y (b). El entorno se ha modelado incluyendo un paisaje a raíz del cierre perimetral de la propia instalación, como muestra la figura 8.1 (c) y (d).

Para la fase de interacción de los usuarios se ha empleado el visor Oculus Rift S (sistema 6Dof, 6 grados de libertad, pantalla LCD con resolución 2560x1440, 1280x1440 por ojo y velocidad de refresco de 80 Hz), cuyo manejo resulta muy intuitivo, incluso para usuarios que no están habituados al uso de este tipo de tecnología.

## Discusión

Una vez se encuentra con el entorno virtual completo, el usuario podrá llevar a cabo dos tipos principales de acciones.

1. Recorrido para formación en el sistema depurativo. En este recorrido, el usuario se podrá desplazar libremente por la instalación, contando con un panel informativo en cada uno de los elementos que componen la instalación, tal como muestra la figura 8.2 (a). Cada panel requiere la interacción del usuario, el cual, pulsando un botón virtual, activará una explicación tanto visual como sonora del funcionamiento de la etapa sobre la que se encuentra actuando.

Igualmente, en el propio recorrido se observará el flujo de agua residual en las diferentes etapas, así como la visualiza-



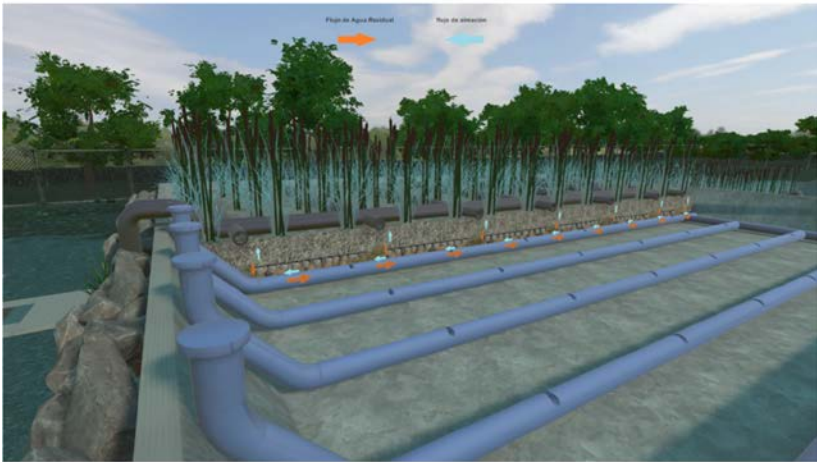
ción de los flujos de aire que permiten airear los cultivos biológicos responsables de la depuración, como puede verse en la figura 8.2 (b). Esto supone una gran ventaja del modelo digital sobre el modelo real, ya que el sistema de tuberías de alimentación y de aireación no está accesible en la instalación real; se favorece así un aprendizaje más detallado.

Por lo tanto, la formación es completa, siendo el propio modelo digital y el entorno los que fomentan la interacción del usuario, motivan su curiosidad y requieren la activación mediante pulsadores de los diferentes paneles explicativos. Así, en el libre desplazamiento por la instalación, el propio usuario puede completar y repetir el proceso de formación tantas veces como sea necesario, asegurando un aprendizaje completo tanto del proceso de depuración como de las etapas depurativas implantadas, las cuales tienen una equivalencia total con el modelo real.

2. Recorrido de formación en la gestión de la instalación. En este caso, el propio usuario podrá acceder a la caseta de pretratamiento, bajar por las escaleras de acceso y observar el pozo de bombeo y el canal de desbaste con el tamiz tornillo en funcionamiento, observando *in situ* el modo de operación en esta etapa del proceso de tratamiento. Podrá acceder a todas las arquetas y levantar la totalidad de tapas disponibles en la instalación real, y observar en las mismas las bombas, el nivel y el flujo de agua residual, tal como se aprecia en la figura 8.3 (a). Podrá, asimismo, acceder al lecho biológico del proceso secundario y del proceso terciario y observar las arquetas de salida y presentación, según se ve en la figura 8.3 (b). Así, realizará un aprendizaje de los procesos realizados en los puntos críticos de la instalación, que son todos aquellos a los que tiene acceso en el modelo digital, y que puede ser de complicado en el acceso a la planta real. Asimismo, aprenderá a identificar y trabajar con los puntos de muestreo para el seguimiento analítico del proceso y adquirirá conocimientos relativos al funcionamiento del lecho bacteriano responsable del proceso depurativo. En pocas palabras, el entorno de realidad virtual permite realizar una formación válida tanto para futuros operadores de mantenimiento como para gestores en este tipo de tecnologías, sin necesidad de desplazamientos a las instalaciones reales.



(a)



(b)

**Figura 8.2.** (a) Paneles informativos interactivos disponibles en el recorrido del modelo de realidad aumentada. (b) Corte transversal del lecho del sistema depurativo mostrando la red de aireación y la dirección del agua residual.



(a)



(b)

**Figura 8.3.** (a) Arqueta de bombeo del agua residual tras su paso por el tratamiento primario. En la figura, la totalidad de los elementos que se muestran son interactivos, es decir, el usuario puede recogerlos, moverlos, abrirlos o cerrarlos. (b) Arqueta de presentación del agua de salida, donde ya se muestra el agua depurada y donde el usuario puede entender el punto de toma de muestra de agua depurada.

## Conclusiones

En el presente trabajo se ha mostrado la versatilidad y potencia que ofrece la modelación en realidad virtual de una planta de tratamiento de aguas residuales híbrida en la que se combinan

tecnologías basada en un tratamiento principal con humedales artificiales con un reactor anaerobio hidrolítico de flujo ascendente, uno de los posibles sistemas depurativos susceptibles de ser instalados en pequeñas poblaciones. El objetivo del modelo desarrollado ha sido proporcionar una herramienta de formación en la tecnología y en la gestión de este tipo de sistemas.

Ha quedado patente que las nuevas instalaciones de depuración, principalmente para pequeños núcleos, por ser el objetivo depurativo principal en los planes de infraestructuras, se basarán en sistemas sostenibles como el que ha sido modelado en el presente trabajo. Sistemas depurativos novedosos sobre los que se requiere difundir tanto sus principios de funcionamiento como su modelo de gestión y mantenimiento para asegurar que una vez que dichos sistemas llegan a la realidad puedan ser mantenidos sin soportar grandes costes. Así, la herramienta basada en un modelo digital de realidad aumentada permite iniciar un proceso de divulgación y formación que facilite la instalación de este tipo de plantas.

## Bibliografía

- [1] PLAN DSEAR. Plan Nacional de Depuración, Sanemianeot, Eficiencia, Ahorro y Reutilización. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-programas-relacionados/>
- [2] Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas L 327, 22 de diciembre de 2000, pp. 1-73. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0060&from=ES>
- [3] Esquemas de Temas Importantes del Tercer Ciclo de Planificación (2021-207). [https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/ETI\\_tercer\\_ciclo.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/ETI_tercer_ciclo.aspx)
- [4] Directiva 91/271/CEE. Directiva del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. L135/40, 30 de mayo de 1991. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0271&from=ES>
- [5] Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (AEAS) y Cátedra AQUAE de Economía del AGUA, Universidad a

Distancia (UNED). Análisis de las necesidades de inversión en renovación de las infraestructuras del Ciclo Urbano del Agua.

- [6] Martín de la Vega, P. T., Chamorro, A., Miranda, F. J., Rivero, P. (2020). *Informe de nuevas oportunidades basadas en la inversión en I+D+i en el sector del agua en Extremadura*. <http://www.oficinaparalainnovacion.es/publicaciones/InformeSectorAguaExtremadura.pdf>
- [7] Fernández-Fernández, M. I., Martín de la Vega, P. T., Jaramillo-Morán, M. A. y Garrido, M. (2020). Hybrid constructed wetland to improve organic matter and nutrient removal. *Water*, 12, 2023. DOI: 10.3390/w12072023.



# Contornos activos aplicados para la reconstrucción 3D de estructuras anatómicas

Active contours applied to 3D reconstruction of anatomical structures

VALENTÍN MASERO

vmasero@unex.es

Departamento de Ingeniería de Sistemas Informáticos y Telemáticos,  
Escuela de Ingenierías Industriales, Badajoz

JOSÉ MORENO

josemore@unex.es

Departamento de Ingeniería de Sistemas Informáticos y Telemáticos,  
Escuela Politécnica. Universidad de Extremadura

## Resumen

En algunas aplicaciones científicas y técnicas, es necesario crear una reconstrucción digital tridimensional (3D) de un objeto, ya sea para permitir la manipulación automática del objeto, para comprender su estructura o para realizar automáticamente un análisis del mismo. La reconstrucción 3D se ha utilizado en el ámbito sanitario para diagnosticar, simular, permitir la planificación quirúrgica y mejorar la cirugía guiada por imágenes, entre otras muchas aplicaciones. Este capítulo presenta un estudio de los métodos informáticos utilizados para llevar a cabo la reconstrucción 3D de estructuras anatómicas. En primer lugar, se revisan las técnicas de adquisición de imágenes 3D. En segundo lugar, se exponen diferentes métodos de segmentación de imágenes, centrándose posteriormente en los contornos activos, que han dado muy buenos resultados en los últimos años para la reconstrucción volumétrica. Posteriormente, también se revisan las técnicas de infografía para la visualización tridimensional. Por último, revisamos los métodos de visualización utilizados para la reconstrucción volumétrica. Por último, indicamos algunas de las líneas de

investigación futuras más prometedoras en la reconstrucción volumétrica y la imagen 3D para mejorar la reconstrucción de estructuras anatómicas.

**Palabras clave:** procesamiento de imágenes, visión artificial, segmentación, contornos activos, reconstrucción tridimensional, 3D, reconstrucción volumétrica, visualización tridimensional, informática gráfica.

### **Abstract**

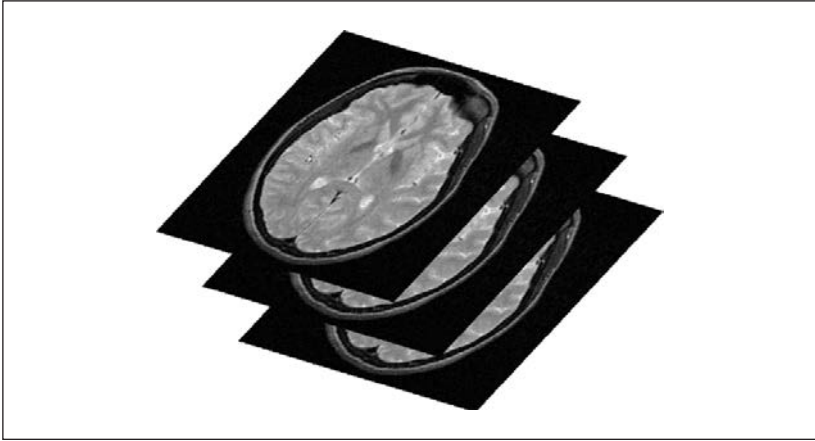
In some scientific and technical applications, it is necessary to create a three-dimensional (3D) digital reconstruction of an object, either to enable automatic manipulation of the object, to understand the structure of the object, or to automatically perform an analysis of the object. 3D reconstruction has been used in the healthcare field to diagnose, simulate, enable surgical planning, and improve image-guided surgery, among many other applications. This chapter presents a survey of computer science methods used to carry out 3D reconstruction of anatomical structures. First, we review 3D image acquisition techniques. Secondly, different image segmentation methods are discussed, with a subsequent focus on active contours, which have given very good results in recent years for volumetric reconstruction. Subsequently, we also review computer graphics techniques for three-dimensional visualisation. Finally, we review the visualisation methods used for volume reconstruction. Finally, we indicate some of the most promising future lines of research in volume reconstruction and 3D imaging to improve the reconstruction of anatomical structures.

**Keywords:** image processing, artificial vision, segmentation, active contours, three-dimensional reconstruction, 3D, volume reconstruction, three-dimensional visualization, computer graphics.

## **Introducción**

Durante décadas, el objetivo de los especialistas en anatomía ha sido analizar correctamente las estructuras anatómicas tridimensionales para diagnosticar mejor las patologías. Desde el descubrimiento de la tomografía computarizada (TC) por Godfrey Newbold Hounsfield, este diagnóstico se lograba observando una gran cantidad de «cortes» tomográficos (ver figura 9.1).





**Figura 9.1.** Colección de imágenes bidimensionales (secciones).

El proceso de construcción de una nueva estructura tridimensional a partir de un conjunto de datos bidimensional se denomina reconstrucción tridimensional (3D). La reconstrucción 3D no solo facilita la construcción de modelos tridimensionales, sino también la visualización, la manipulación y el análisis de la información obtenida de los datos de la imagen.

## Imágenes tridimensionales en el campo de la Sanidad

En 1977, Herman y Liu publicaron sus primeras reconstrucciones 3D [1]. En 1978 Rhodes [2] presentó un algoritmo para encontrar las fronteras de los objetos utilizando un algoritmo de crecimiento de regiones bidimensionales y una estrategia de control basada en una búsqueda automática de fronteras en los planos vecinos. A medida que el algoritmo avanzaba de un plano al siguiente, la región de la imagen que se encontraba en el plano anterior se utilizaba como semilla de la región en el siguiente plano. En ese momento, también apareció un algoritmo de búsqueda de fronteras que fue implementado por Liu [3]. Liu combinó varias secciones transversales juntas, formando una matriz tridimensional de números de TC. Este algoritmo seleccionó los puntos frontera de los vecinos tridimensionales de los puntos frontera anteriores que tenían el mayor gradiente y concordancia con un conocimiento previo del borde. Esos son los primeros antecedentes, hasta donde sabemos, de reconstrucción 3D de estructuras anatómicas.

Hoy en día, muchas aplicaciones en el campo de las imágenes médicas dependen de la definición precisa de las líneas de contorno de los objetos [4]. La extracción de estos contornos se realiza en la fase de segmentación. Por lo tanto, la segmentación es normalmente un punto clave en las operaciones de imágenes 3D. Al igual que otros autores [5], nosotros consideramos que la segmentación es el paso más delicado y crítico de todas las fases dentro de la reconstrucción 3D y de las aplicaciones que trabajan con imágenes 3D (ver figura 9.3b). Por esta razón, vamos a centrar una parte importante de este capítulo/artículo en la segmentación.

Este capítulo/artículo tiene cuatro objetivos clave. En primer lugar, vamos a proporcionar una visión general del tema de la reconstrucción 3D. En segundo lugar, vamos a destacar la importancia de la fase de segmentación dentro del proceso de reconstrucción 3D. En tercer lugar, propondremos los contornos activos como la mejor técnica para desarrollar esta segmentación. Por último, también exploraremos el proceso de visualización que se debe efectuar después de obtener una buena reconstrucción 3D.

## Contornos activos para la segmentación y visualización de imágenes médicas

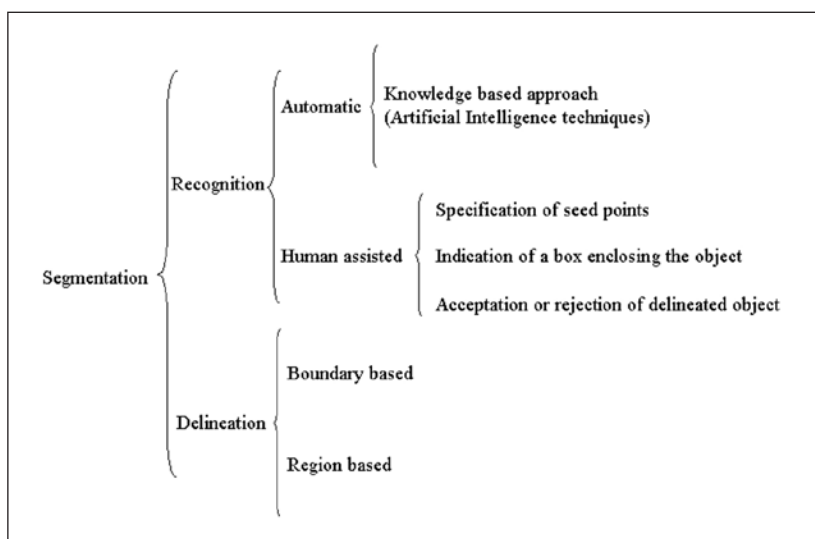
### Segmentación

La segmentación suele ser una etapa de procesamiento inicial para extraer regiones de interés o características para otra tarea posterior (por ejemplo, reconstrucción 3D). Se puede encontrar una introducción más específica a este tema en [6, 7, 8, 9, 10].

Muchas aplicaciones en el procesamiento de imágenes médicas dependen de la definición precisa de los contornos de los objetos [4]. La extracción de estos contornos se realiza en la fase de segmentación. Por lo tanto, la segmentación es normalmente necesaria para las operaciones de imágenes 3D. Junto con otros autores, consideramos que esta es la parte más difícil de todas las operaciones de imágenes 3D [5]. Por lo tanto, la segmentación es el paso más difícil en el proceso de reconstrucción 3D.

Por esta razón, vamos a centrar una parte importante de este artículo en la segmentación.

Se puede apreciar que la segmentación consiste en dos tareas relacionadas: reconocimiento y delineación. El reconocimiento es el proceso de determinar aproximadamente la ubicación de los objetos en la escena. La delineación es el proceso de determinar con precisión la extensión espacial y la composición de los objetos de la escena [11]. Pero el reconocimiento y la delineación no son pasos completamente separados en la segmentación [5]. En la figura 9.2 se muestra una posible clasificación [5] de las tareas de segmentación.



**Figura 9.2.** Clasificación de las técnicas de segmentación para imagenología 3D basada en la clasificación de Udupa [5].

Para detectar contornos en general, se han aplicado multitud de algoritmos diferentes [12]. Para extraer contornos dentro de imágenes médicas, algunas de las aplicaciones de segmentación más exitosas se han realizado con contornos activos [13]. Estas técnicas han sido utilizadas ampliamente para interpretar imágenes médicas, por ejemplo, por Amini y otros [14], Ayache y otros [15] y Cootes y otros [16].

## Segmentación de imágenes médicas basada en contornos activos

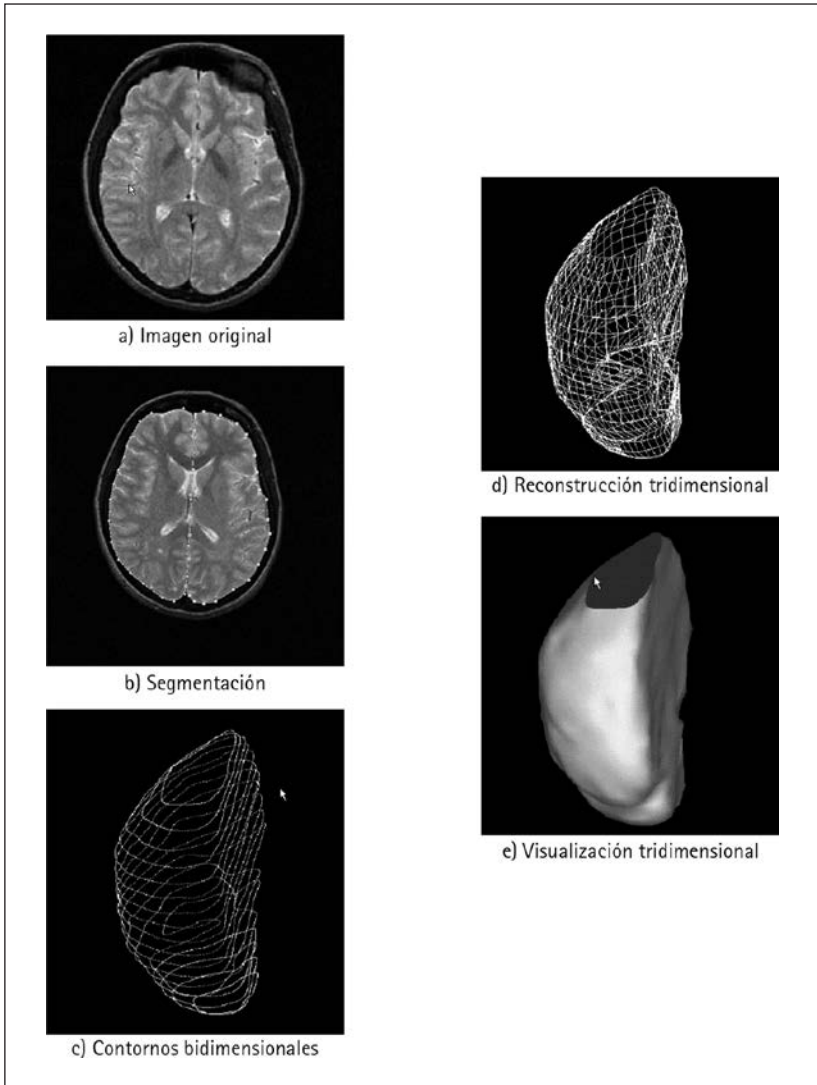
Los contornos activos han logrado un gran éxito en la segmentación de imágenes médicas [4, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27] y en la segmentación en general [28, 29, 30]. Como ejemplo ilustrativo mencionamos el trabajo de Marais y otros [31], donde miden la asimetría de los hemisferios cerebrales del cerebro (figura 9.3.a).

En los últimos años han aparecido dos enfoques que compiten entre sí. El primer enfoque que se hizo público fueron los contornos activos de manera explícita (o paramétrica). Los primeros científicos en utilizar un enfoque de contorno paramétrico fueron Kass y otros en su revolucionario artículo [32]. Después de eso, varios autores presentaron diferentes enfoques; por ejemplo, Cohen y otros [33] introdujeron el uso de modelos de elementos finitos, Hug y otros [18] introdujeron curvas de subdivisión y Metaxas y Terzopoulos introdujeron los modelos analíticos [34].

El segundo enfoque es el de los contornos activos de manera implícita. La representación implícita de los contornos activos fue introducida por Malladi y otros [35] y posteriormente fue utilizada por Sethian [36] y muchos otros. Así, Caselles y otros [37] introdujeron el concepto de «serpientes geodésicas» utilizando un enfoque muy similar.

La principal ventaja de la representación implícita es su capacidad de cambiar automáticamente la topología del contorno durante el proceso de remodelación. Debido a esta capacidad, es un buen método para detectar contornos de geometría complicada.

En el campo de las aplicaciones médicas, la interacción entre el usuario y el ordenador es importante en el proceso de extracción de los contornos de las imágenes, y debe ser especialmente considerada porque la posición inicial del contorno activo tiene una gran influencia en el resultado final. En la mayoría de los casos, los contornos activos requieren algún nivel de interacción con el usuario para modificar la forma del contorno, mientras que en las aplicaciones médicas esta característica es de gran importancia [19]. Por ejemplo, la metodología propuesta por Honea y otros [17] implica este tipo de interacción. En este ejemplo, cuando el personal médico indica la parte de la imagen que



**Figura 9.3.** Reconstrucción 3D del hemisferio cerebral utilizando contornos activos (imágenes cortesía de Patrick Marais desarrolladas en la Universidad de Oxford). a) Un corte de resonancia magnética. b) Dos hemisferios cerebrales segmentados utilizando contornos activos. Los contornos activos fueron engrosados para que se viesen mejor. c) Contornos 2D obtenidos por segmentación. Se muestran los contornos activos que constituyen el límite del hemisferio izquierdo. d) Malla 3D obtenida después de la reconstrucción volumétrica obtenida a partir de los contornos 2D generados en la fase b de segmentación. e) Visualización tridimensional del hemisferio cerebral [31].

desea separar (para obtener el estudio 3D final), inicializa el contorno manualmente indicando una elipse que encierra el objeto. Para un estudio más detallado de la interacción hombre-máquina en la segmentación de las imágenes médicas ver [38].

En contornos activos paramétricos, se pueden considerar tres niveles de modelado diferentes: discretización, forma y topología [19]. Mientras que en la mayoría de las implementaciones algunos de estos tres algoritmos están relacionados [32, 36], en [19] son completamente independientes entre sí.

## Gráficos por ordenador para la reconstrucción y visualización tridimensional

Después de haber obtenido los contornos, es necesario construir la estructura 3D. La mayoría de los métodos de reconstrucción tratan los datos como una imagen 3D obtenida al apilar las imágenes de las secciones transversales (ver figuras 9.1 y 9.3c). Tanto la interpolación como la replicación de cortes se utilizan para llenar los espacios entre los cortes [39, 40, 41, 42]. Existen muchos algoritmos para interpolar los datos que faltan creando una superficie virtual aproximada [43, 44, 45, 46]. Las principales ventajas de estas técnicas son su simplicidad y su idoneidad para la técnica de visualización llamada *volume rendering* [47, 48, 49]. Pero las desventajas de estas técnicas son el gran almacenamiento de datos requerido, junto con el costo computacional y el retraso asociado con el cálculo del espacio de visualización.

A veces la superficie resultante puede presentar cambios abruptos. Para evitar estos cambios, Barequet y otros [50] interpolan más de dos capas al mismo tiempo, es decir, no se consideran independientes y utilizan las pendientes de los triángulos creados en la interpolación de capas vecinas para guiar la interpolación de la capa actual.

### Visualización

Después de haber obtenido la reconstrucción 3D final, es necesario realizar operaciones de visualización para poder crear escenas. Las técnicas de visualización se pueden clasificar en objetos y escenas.

Cronológicamente, los enfoques basados en objetos se desarrollaron primero. En las técnicas basadas en objetos, primero se definen explícitamente las estructuras que representan la información del objeto y después se representan. En las técnicas basadas en escenas, las representaciones se crean directamente a partir de escenas dadas.

- **Técnicas de visualización basadas en escenas.** Dentro de la clase basada en escenas podemos distinguir dos subclases diferentes: el modo *slice* y el modo volumen. En el modo *slice*, las escenas dadas se separan en escenas 2D (*slices*) y las escenas 2D se muestran directamente en la pantalla. En el modo volumen, la información del objeto 3D se muestra en la pantalla utilizando técnicas de renderización.
- **Técnicas de visualización basadas en objetos.** En los métodos de visualización basados en objetos, primero se definen los objetos explícitamente y después se renderizan. Cuando la segmentación no funciona correctamente o cuando consume demasiado tiempo, no es eficiente utilizar el renderizado directo basado en la escena. En estos casos, es esencial la fase de completar la definición de la estructura.

## Perspectivas futuras

Duncan y Ayache [13] señalaron varios problemas que habría que resolver. Estos fueron principalmente problemas de investigación clásicos que aún permanecen sin resolver en imágenes médicas tridimensionales. Indicaron varios puntos importantes en los que los sistemas de imágenes médicas deberían mejorar. Primero, necesitamos unir los algoritmos actuales y las imágenes en 3D en el nivel de órgano o macroscópico, a los niveles moleculares o celulares de una manera más profunda que la que se ha hecho hasta ahora. Por lo tanto, los avances en el nivel de órgano pueden usarse en combinación con la microscopía para obtener una nueva y mejor comprensión de la función fisiológica. También es conveniente que los enfoques de procesamiento de imágenes estén conectados con las estrategias de adquisición de imágenes. Otra forma de mejorar las imágenes médicas y hacer que los algoritmos sean más robustos sería considerar varias tareas de imágenes médicas juntas en lugar de aisladas. Además, la necesidad de desarro-

llar enfoques apropiados de validación y evaluación debe explorarse más a fondo, con la formación de bases de datos comunes donde los algoritmos se puedan comparar y contrastar entre sí.

En el futuro cercano, será necesario seguir investigando para tener en cuenta nuevos enfoques como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo para mejorar los resultados en las diferentes fases de segmentación y reconstrucción 3D.

## Conclusiones

La segmentación es la fase más desafiante durante el proceso de reconstrucción 3D. Y los contornos activos son muy apropiados para lograr buenos resultados al final de la etapa de segmentación.

Es necesario seguir trabajando para aplicar nuevos enfoques como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo a los procesos de segmentación y reconstrucción 3D.

## Reconocimientos

Agradecemos a Patrick Marais y otros [31] permitir el uso de sus imágenes en las figuras. También agradecemos al equipo del Centro de Cirugía Mínimamente Invasiva Jesús Usón de Cáceres, España, el asesoramiento médico al inicio de este estudio y al Departamento de Ingeniería Médica y al Departamento de Informática de la Wake Forest University en Winston-Salem, Carolina del Norte, Estados Unidos, su ayuda en la primera etapa del estudio de los contornos activos.

## Bibliografía

- [1] Herman, G. T. y Liu, H. K. (1977). Display of three-dimensional information in computed tomography. *J. Comput. Assist. Tomogr.*, 1, 155-160.
- [2] Rhodes, M. L. (1978). *Interactive object isolation from parallel image planes* (Ph. D. tesis). University of California, Los Angeles.



- [3] Liu, H. K. (1977). Two and three-dimensional boundary detection. *Computer Graphics and Image Processing*, 6, 123-134.
- [4] Ranganath, S. (1995). Contour extraction from cardiac MRI studies using snakes. *IEEE Trans. Medical Imaging*, 14 (2), 328-338.
- [5] Udupa, J. K. y Herman, G. T. (eds.) (2000). *3D imaging in medicine*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- [6] Haralick, R. y Shapiro, L. (1992). *Computer and robot vision* (vols. I, II). Addison-Wesley.
- [7] Gonzalez, R. C. y Woods, R. E. (1992). *Digital image processing*. Addison-Wesley. New York.
- [8] Russ, J. C. (1999). *The image processing handbook* (3.<sup>a</sup> ed.). CRC Press, IEEE Press, Boca Raton, FL.
- [9] Ayache, N., Cinquin, P., Cohen, I. *et al.* (1995). Segmentation of complex 3D medical objects: a challenge and a requirement for computer assisted surgery planning and performing. En: R. Taylor, S. Lavallee, G. Burdea y R. Moesges (eds.). *Computer integrated surgery* (pp. 59-74). MIT Press.
- [10] Udupa, J. K. (2000). 3D imaging: principles and approaches. En: J. K. Udupa y G. T. Herman (eds.). *3D imaging in medicine* (pp. 1-73). CRC Press. Boca Raton, FL.
- [11] Udupa, J. K. (2000). Go digital, go fuzzy. En: G. Borgefors, I. Nyström y G. Sanniti di Baja (eds.). *Discrete geometry for computer imagery (DGCI'00), number 1953 in LNCS* (pp. 284-295). Nueva York: Springer, Berlin Heidelberg.
- [12] Gong, X. Y., Su, H., Xu, D., Zhang, Z.-T., Shen, F. y Yang, H.-B. (2018). An overview of contour detection approaches. *International Journal of Automation and Computing*, 15 (6), 656-672.
- [13] Duncan, J. S. y Ayache, N. (2000). Medical image análisis: progress over two decades and the challenges ahead. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22 (1), 85-106.
- [14] Amini, A., Owen, R., Staib, L. *et al.* (1991). Non-rigid motion models for tracking the left ventricular wall. En: A. C. F. Colchester y D. Hawkes (eds.). *Lecture notes in computer science: information processing in medical images* (pp. 343-357). Springer-Verlag.
- [15] Ayache, N., Cohen, I. y Herlin, I. (1992). Medical image tracking. En: Blake, A. y Yuille, A. (eds.). *Active vision* (pp. 285-302). MIT.
- [16] Cootes, T., Hill, A., Taylor, C. *et al.* (1994). The use of active shape models for locating structures in medical images. *J. Image and Vision Computing*, 12 (6), 355-366.

- [17] Honea, D. M., Ge, Y., Snyder, W. E. *et al.* (1997). Lymph-node segmentation using active contours. En: *Proceedings of SPIE Medical Imaging*. Image Processing (vol. 3034).
- [18] Hug, J., Brechbühler, C. y Szekeley, G. (1999). Tamed snake: a particle system for robust semi-automatic segmentation. En: C. Taylor y A. Colchester (eds.). *Second International Conference on Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention (MICCAI'99)* (pp. 106-115) (number 1679 in LNCS). Cambridge: Springer.
- [19] Delingette, H. y Montagnat, J. (2001). Shape and topology constraints on parametric active contours. *Computer Vision and Image Understanding*, 83, 140-171.
- [20] Suri, J. S., Liu, K., Singh, S., Laxminarayan, S. N., Zeng, X. y Reden. L. (2002). Shape recovery algorithms using level sets in 2-D/3-D medical imagery: a state-of-the-art review. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 6 (1), 8-28.
- [21] B. Tanoori, Z., Azimifar, A., Shakibafar, S. Katebi (2011). Brain volumetry: an active contour model-based segmentation followed by SVM-based classification. *Computers in Biology and Medicine*, 41, 619-632.
- [22] Yin, L. M. (2011). A new image segmentation approach using region-based active contour model. *IJACT: International Journal of Advancements in Computing Technology*, 3 (10), 349-356.
- [23] D. K. Kong y Wenwu, Yang (2012). Adaptive finite elements based graph partitioning active contours for SAR image segmentation. *IJDCTA: International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 6 (8), 160-168.
- [24] Zhu, X. J., Zhang, P. F., Shao, J. H., Cheng, Y. Z., Zhang, Y. y Bai, J. (2011). A snake-based method for segmentation of intravascular ultrasound images and its in vivo validation. *Ultrasonics*, 51, 181-189.
- [25] Xu, X. Y., Zhou, Y., Cheng, X. Y., Song, E. y Li, G. K. (2012). Ultrasound intima-media segmentation using Hough transform and dual snake model. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 36, 248-258.
- [26] Zhou, H. Y., Schaefer, G., Celebi, M. E. Lin, F. Q. y Liu, T. W. (2011). Gradient vector flow with mean shift for skin lesion segmentation. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 35, 121-127.
- [27] Guo, M., Wang, Z., Ma, Y., Xie, W. (2013). Review of parametric active contour models in image processing. *Journal of Convergence Information Technology (JCIT)*, 8 (11), 248-258.

- [28] McInerney, T. y Terzopoulos, D. (1996). Deformable models in medical image analysis: a survey. *Medical Image Analysis*, 1 (2), 91-108.
- [29] Blake, A. y Isard, M. (1998). *Active contours: the application of techniques from graphics, vision, control theory and statistics to visual tracking of shapes in motion*. Londres: Springer-Verlag.
- [30] Rodtook, A. y Makhanov, S. S. (2010). Continuous force field analysis for generalized gradient vector flow field. *Pattern Recognition*, 43, 3522-3538.
- [31] Marais P., Guillemaud R., Sakuma M. *et al.* (1996). Visualising cerebral asymmetry. En: K. H. Hohne y R. Kikinis (eds.). *Proc visualisation in biomedical computation (VBC'96) in Lecture notes in computer science 1131* (pp. 411-416). Hamburgo: Springer Verlag.
- [32] Kass, M., Witkin, A. y Terzopoulos, D. (1988). Snakes: active contour models. *International Journal of Computer Vision*, 1, 321-331.
- [33] Cohen, I., Cohen, L. y Ayache, N. (1992). Using deformable surfaces to segment 3-D images and infer differential structures. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding*, 56 (2), 242-263.
- [34] Metaxas, D. y Terzopoulos, D. (1991). Constrained deformable superquadrics and nonrigid motion tracking. En: *International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR' 91)* (pp. 337-343). Maui, Hawai.
- [35] Malladi, R., Sethian, J. y Vemuri, B. (1995). Shape modeling with front propagation: a level set approach. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17 (2), 158-174.
- [36] Sethian, J. (1996). *Level set methods: evolving interfaces in geometry, fluid mechanics, computer vision and materials science*. Cambridge University Press.
- [37] Caselles, V., Kimmel, R. y Sapiro, G. (1997). Geodesic active contours. *International Journal of Computer Vision*, 22 (1), 61-79.
- [38] Olabarriaga, S. D. (1999). *Human-computer interaction for the segmentation of medical images* (Ph. D. tesis). University of Amsterdam.
- [39] Boissonnat, J. D. (1988). Shape reconstruction from planar cross sections. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 44, 1-29.
- [40] Farrell, E. J., Yang, W. C. y Zappulla, R. A. (1985). Animated 3D CT imaging. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 5, 26-32.
- [41] Vannier, M. W., Marsh, J. L. y Warren, J. O. (1983). 3D computer graphics for craniofacial surgical planning and evaluation. *Computer Graphics*, 17, 263-273.

- [42] Cong, G. y Parvin, B. (2001). Robust and efficient surface reconstruction from contours. *The Visual Computer*, 7 (4), 199-208.
- [43] Fuchs, H., Kedem, Z. M. y Uselton, S. P. (1977). Optimal surface reconstruction form planar contours. *Communications of the ACM*, 20 (10), 693-702.
- [44] Sloan, K. R. y Painter, J. (1988). Pessimial guesses may be optimal: a counterintuitive search result. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, (PAMI)*, 10 (6), 949-955.
- [45] Keppel, E. (1975). Approximating complex surfaces by triangulation of contour lines. *IBM J. Res. Develop.*, 2-10.
- [46] Wang, Y. F. y Aggarwal, J. K. (1986). Surface reconstruction and representation of 3-D scenes. *Pattern Recognition*, 19, 197-207.
- [47] Drebin, R. A., Carpenter, L. y Hanrahan, P. (1988). Volume rendering. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, 22, 65-74.
- [48] Lorensen W. E. y Cline, H. E. (1987). Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm. *Computer Graphics*, 21, 163-169.
- [49] Sabella, P. (1988). A rendering algorithm for visualizing 3D scalar fields. *ACM Computer Graphics*, 22 (4), 51-58.
- [50] Barequet, G., Shapiro, D. y Tal, A. (2000). Multilevel sensitive reconstruction of polyhedral surfaces from parallel slices. *The Visual Computer*, 16 (2), 116-133.

# Antioxidantes naturales como aditivos sostenibles para la mejora de la estabilidad a la oxidación de biodiésel

*Natural antioxidants as sustainable additives for the improvement of biodiesel oxidation stability*

SERGIO NOGALES DELGADO

Departamento de Ingeniería Química y Química-Física, Facultad de Ciencias,  
Universidad de Extremadura, Badajoz  
senogalesd@unex.es

JOSÉ MARÍA ENCINAR MARTÍN

Departamento de Ingeniería Química y Química-Física, Facultad de Ciencias,  
Universidad de Extremadura, Badajoz  
jencinar@unex.es

JUAN FÉLIX GONZÁLEZ GONZÁLEZ

Departamento de Física Aplicada, Escuela de Ingenierías Industriales,  
Universidad de Extremadura, Badajoz  
jfelixgg@unex.es

ANDRÉS ÁLVAREZ

Departamento de Física Aplicada, Escuela de Ingenierías Industriales,  
Universidad de Extremadura, Badajoz

## Resumen

El uso de biodiésel es cada vez más extendido; se obtiene principalmente mediante transesterificación de aceites vegetales. Sin embargo, la estabilidad a la oxidación de estos biocombustibles es relativamente baja, principalmente debido a la presencia de esteres metílicos de ácidos grasos que presentan insaturaciones conjugadas, como el linoleato de metilo. Como consecuencia, las propiedades del biodiésel podrían verse alteradas durante el almacenamiento,

hecho que se puede evitar mediante la adición de antioxidantes. Así, los antioxidantes naturales podrían sustituir a algunos antioxidantes tradicionales tales como TBHQ o BHA, haciendo todo el proceso de elaboración más sostenible y menos dañino para el medioambiente. El objetivo de este trabajo fue valorar el efecto de dos antioxidantes naturales (como son el ácido ascórbico y el ácido tánico, presentes en muchos productos hortofrutícolas) en la estabilidad a la oxidación de biodiésel proveniente de aceite de cártamo y de colza.

**Palabras clave:** FAME, método Rancimat, aceites vegetales, ácido ascórbico, ácido tánico.

### **Abstract**

Biodiesel is becoming more and more important, and it is mainly obtained through transesterification of vegetable oils. However, its oxidative stability is, in most cases, relatively short, due to the presence of compounds like methyl linoleate. As a consequence, the properties of biodiesel can be altered during storage, which can be avoided by adding antioxidants. Thus, some natural antioxidants can be a suitable replacement for artificial ones like TBHQ or BHA, making the whole process sustainable and environmentally-friendly. The aim of this research work was to assess the effect of natural antioxidants (like ascorbic and tannic acid) on the oxidative stability of rapeseed and safflower biodiesel.

**Keywords:** FAMES, Rancimat method, vegetable oils, ascorbic acid, tannic acid.

## **Introducción**

Como es bien sabido, el biodiésel es un biocombustible que puede usarse directamente en motores diésel siempre que se cumpla con una serie de condiciones, lo cual lo convierte en una alternativa real al diésel de origen mineral. De este modo, la elaboración y uso de biodiésel en dichos motores presenta una serie de ventajas, tales como nulas emisiones netas de CO<sub>2</sub> (ya que las emisiones de este gas en el motor de combustión han sido previamente asimiladas por los vegetales de los que se obtiene el biodiésel), mayor seguridad durante el almacenamiento (debido principalmente al mayor punto de inflamación y combustión que presenta el biodiésel en comparación con su equivalente de origen mineral) e incluso mejor comportamiento, en algunos aspectos, en el motor diésel. Asimismo, es más biodegradable, por lo que resultaría menos dañino para el medioambiente en caso de fuga incontrolada, ya que dicho vertido sería más asimilable

en los ecosistemas (Rodionova *et al.*, 2017; Aransiola *et al.*, 2014; Knothe y Razon, 2017). Por otra parte, la implantación de plantas químicas para la elaboración de biodiésel (ya sea este proceso su único fin, o bien formando parte de una biorrefinería) contribuye al desarrollo sostenible de regiones o países en vías desarrollo, o bien presentan una alternativa factible a ciertos países que son dependientes del petróleo y carecen del mismo. Así, muchos aceites de origen vegetal (como el aceite de colza o cártamo, los cuales se analizarán en este estudio debido a su amplio uso y potencial en zonas cálidas y secas), entre otros residuos como grasas animales o aceites de fritura, pueden contribuir al desarrollo sostenible de muchas regiones (Ilkiliç *et al.*, 2011; Mihaela *et al.*, 2013; Martínez *et al.*, 2014; Qiu *et al.*, 2011).

Sin embargo, de forma general, el biodiésel obtenido a partir de aceite vegetal presenta una desventaja, y es que suele ser inestable a la oxidación, lo cual es un problema a la hora de mantener este producto almacenado, ya que pierde calidad con el tiempo debido a la alteración de las propiedades físico-químicas de este biocombustible, tales como la alteración de la viscosidad (la cual suele incrementarse, siendo difícil el tránsito del biodiésel por el motor) y la bajada en la composición de ésteres metílicos de ácidos grasos (principales componentes del biodiésel, los cuales se degradan al darse procesos de polimerización). Como consecuencia, un biodiésel puede llegar a perder los principales parámetros de calidad en un espacio de tiempo relativamente corto, incluso en pocos meses (Popović-Djordjević *et al.*, 2018; Kumar, 2017; Christensen y McCormick, 2014). Esta baja estabilidad a la oxidación suele ser debida a la presencia de compuestos insaturados, tales como el linoleato o el linolenato de metilo, cuyas insaturaciones suelen constituir un punto débil para su reacción con radicales libres, lo cual lleva a una reacción en cadena que suele acabar con la polimerización de tales compuestos, por lo que se generan moléculas complejas que alteran la viscosidad del biocombustible almacenado.

Así, aparte de la búsqueda de otras alternativas como son el uso de cultivos modificados genéticamente (que reduzcan la composición de tales ésteres metílicos en favor de otros más estables, tales como el oleato de metilo), la forma más empleada para mejorar la estabilidad a la oxidación del biodiésel durante su almacenamiento es el empleo de antioxidantes, ya sean artifi-

ciales o naturales. El mecanismo de actuación de los mismos puede ser mediante quelación (para retirar metales que suelen actuar como catalizadores en la autooxidación) o a través de la interacción con los radicales libres generados durante tal oxidación, neutralizándolos (Christensen y McCormick, 2014; Varatharajan y Pushparani, 2018; Popović-Djordjević *et al.*, 2018).

De esta forma, el empleo de antioxidantes artificiales como butilhidroxianisol (BHA) y terbutilhidroquinona (TBHQ) ha sido muy extendido a tal fin, pues se ha llegado a emplear, de forma general, en concentraciones de hasta 2000 ppm, y se ha dado normalmente un incremento considerable en la estabilidad a la oxidación del biodiésel, con lo que queda probada la gran efectividad de tales aditivos (Dunn, 2005; Van der Westhuizen y Focke, 2018; Saluja, Kumar y Sham, 2016).

Por otra parte, los antioxidantes sintéticos pueden mostrar efectos adversos para el medioambiente y la salud, con lo que la búsqueda de antioxidantes naturales comienza a tener gran repercusión. Esto es debido principalmente a que el uso de tales antioxidantes naturales se ve fomentado por el simple hecho de avanzar hacia procesos que sean lo menos perjudiciales para el medioambiente como sea posible. Así, la implementación de biorrefinerías (donde la transesterificación de aceites vegetales para producir biodiésel podría ser una línea fundamental para determinados casos) no se entendería si a su vez se tiene que recurrir a una proporción mayoritaria de compuestos artificiales que intervengan en el proceso. De hecho, algunos investigadores han estudiado la aplicación de antioxidantes naturales para tal fin, como el ácido tánico (Gülçin *et al.*, 2010) o el ácido ascórbico (Shuster *et al.*, 2018), así como otros, incluyendo los extractos naturales obtenidos a partir de ciertos productos o residuos agroindustriales (Delgado, García-Rico y Franco, 2014; De Sousa *et al.*, 2014). Sin embargo, es tal la variedad y procedencia de dichos antioxidantes naturales que el uso de muchos de ellos no es aún ampliamente conocido, por lo que la aplicación de antioxidantes naturales en biodiésel podría ser una línea de investigación con un gran potencial y recorrido a medio y largo plazo.

El objetivo de este trabajo fue valorar la efectividad del uso de dos antioxidantes naturales (tales como los ácidos tánico y ascórbico) en la mejora de la estabilidad a la oxidación de bio-



diésel obtenido a partir de aceites vegetales (concretamente, de cártamo y colza). Para tal fin, se llevó a cabo una amplia caracterización del biodiésel, así como la adición de tales antioxidantes a diferentes concentraciones. También se compararon los resultados obtenidos con otros antioxidantes equivalentes de uso más popular, como BHA y TBHQ, para valorar así la efectividad real de los antioxidantes naturales y su posible uso en la industria.

## Materiales y métodos

Para llevar a cabo la elaboración del biodiésel, se emplearon como materia prima aceite vegetal de colza y cártamo. El aceite fue extraído a partir de semillas de cártamo y colza en la Finca La Orden, perteneciente al Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX), en marzo de 2019.

Una vez obtenido, se llevó a los laboratorios (en recipientes de 20 litros y estancos) para llevar a cabo la reacción de transesterificación y obtener los correspondientes ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiésel). Así, de acuerdo con estudios previos (Martínez *et al.*, 2014), las condiciones de la reacción química de transesterificación son las descritas en la tabla 10.1. Cabe destacar que tales condiciones fueron seleccionadas debido al gran rendimiento obtenido, asegurándose una alta conversión de los aceites vegetales seleccionados. Así, se añadieron las proporciones adecuadas de aceite y metanol en un reactor conectado con un refrigerante, y una vez que se alcanzó la temperatura de reacción adecuada, se añadió el catalizador, dando comienzo a la reacción en ese instante. La temperatura máxima de trabajo fue a 60 °C para así evitar la evaporación excesiva de metanol (el cual, en caso de evaporarse, se recogía y reintroducía de nuevo en el reactor mediante un refrigerante).

El uso de la relación molar tan elevada, así como el tiempo de reacción y la cantidad de catalizador utilizado tuvieron como objetivo desplazar el equilibrio de la reacción de transesterificación hacia la generación de productos (en este caso, glicerina y ésteres metílicos de ácidos grasos).

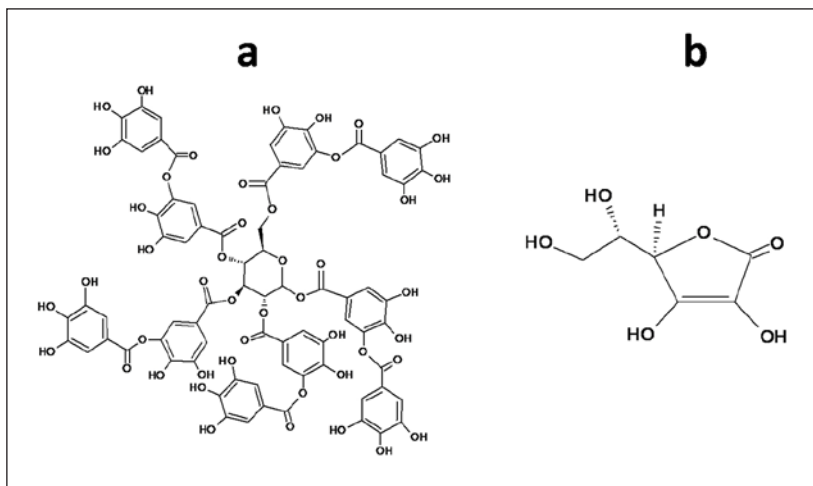
**Tabla 10.1.** Condiciones de transesterificación

Alcohol empleado	Metanol
Temperatura de reacción (°C)	60 °C
Relación molar metanol/ácido graso	6:1
Tiempo de reacción (h)	2
Catalizador empleado (%)	Metóxido de sodio, 1.5 %
Agitación (rpm)	700

Una vez terminada la reacción, se procedió a la purificación del producto obtenido eliminando el metanol restante mediante evaporación y retirando la glicerina generada del medio de reacción mediante reposo y su posterior decantación. Finalmente, se llevaron a cabo sucesivos lavados del biodiésel obtenido con agua destilada (se separó igualmente por decantación el agua lavada) para eliminar posibles restos del catalizador empleado, y se secó la muestra lavada por encima de los 100 °C para eliminar la humedad de la misma. Posteriormente, se guardó el biodiésel final en frascos de topacio de 5 litros, almacenándose a oscuridad y a temperatura ambiente, a la espera de la caracterización y tratamiento del biodiésel obtenido. Para tal caracterización, se siguió la normativa vigente para la determinación de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) mediante cromatografía de gases acoplada a detector de ionización de llama, densidad, viscosidad, punto de obstrucción de filtro en frío (POFF), índices de yodo y acidez, puntos de inflamación y combustión y estabilidad a la oxidación mediante el método Rancimat (UNE-EN 14214:2013 V2+A1:2018).

En lo que respecta a la adición de antioxidantes naturales, dos compuestos presentes en múltiples productos naturales se utilizaron para esta experiencia: ácidos tánico y ascórbico (Panreac Applichem, ver sus estructuras moleculares en la figura 10.1). De esta forma, el estudio contempla la adición de tales compuestos en estado puro (superando el 99 % de pureza en ambos casos). Así, se añadió la cantidad adecuada para obtener concentraciones del antioxidante de 0 (control), 250, 500, 1000 ppm en el biodiésel. Para una correcta disolución del antioxidante, se procedió al uso de un baño de ultrasonidos durante un minuto con el fin de evitar que el aditivo permaneciese precipitado en el bio-

diésel. Una vez elaborada la disolución, se sometió al método Rancimat para determinar la estabilidad a la oxidación (Focke, Westhuizen y Oosthuysen, 2016).



**Figura 10.1.** Estructura de los antioxidantes utilizados: a) ácido tánico b) ácido ascórbico.

## Resultados y discusión

Tras la elaboración de biodiésel, se obtuvieron buenos rendimientos tanto para cártamo como para colza; se superó el 96 % en ambos casos y se cumplió con la normativa. En la tabla 10.2 se muestra un resumen de las principales características del biodiésel obtenido, con una comparación con la normativa UNE-EN 14214. Como puede observarse, ambos biocombustibles cumplieron con la normativa en la mayoría de los parámetros estudiados, con excepción de la estabilidad a la oxidación (lo cual, como ya se comentó en la introducción, era esperable), cuyos puntos de inducción fueron de 5.8 y 1.5 horas para el biodiésel de colza y cártamo, respectivamente, luego no se cumplió con el mínimo exigido de ocho horas. Tal comportamiento es común en el biodiésel, se mostró normalmente bajos valores de estabilidad oxidativa para el biodiésel obtenido a partir de diversos aceites de origen vegetal (Jain *et al.*, 2003; Kumar, 2017). También cabe destacar que, si bien el índice de yodo está por debajo del

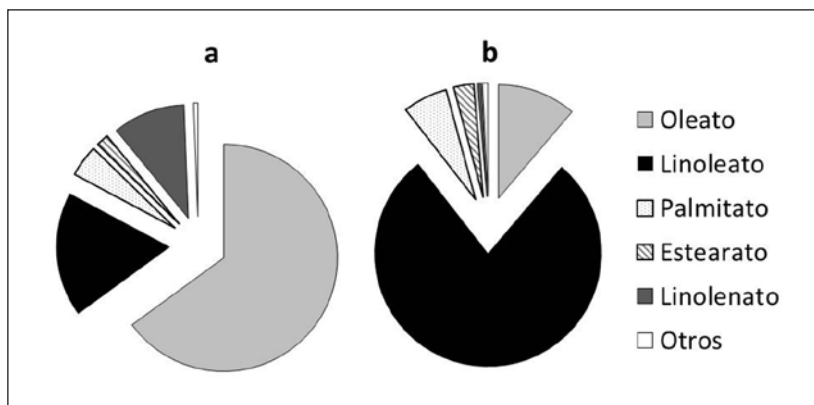
límite establecido, en el caso del biodiésel de cártamo es mayor que para el biodiésel de colza. Dicho parámetro es un dato orientativo sobre la presencia de insaturaciones en el biocombustible, con lo que a mayor índice de yodo se obtenga, mayor será el número de dobles enlaces en el biodiésel, y consecuentemente la estabilidad a la oxidación será menor.

Cabe destacar el elevado punto de inflamación obtenido en ambos casos, lo cual asegura que el almacenamiento de ambos biocombustibles es más que seguro. Dicho resultado es típico en los biocombustibles obtenidos de origen vegetal, lo cual es una de las grandes ventajas con respecto al diésel de origen mineral.

**Tabla 10.2.** Características del biodiésel obtenido y comparación con la norma UNE-EN 14214

Propiedad	Biodiésel colza	Biodiésel cártamo	UNE-EN 14214
FAME (%)	96.69	96.74	96.5 (mínimo)
Viscosidad (a 40 °C, cSt)	4.91	4.42	3.5 – 5.0
Densidad (a 15 °C, g·ml <sup>-1</sup> )	0.865	0.883	0.860 – 0.900
Punto de obstrucción de filtro en frío (°C)	-4	-2	-20 – +5
Punto de inflamación (°C)	181	179	120 (mínimo)
Índice de acidez (mg KOH·g <sup>-1</sup> )	0.32	0.35	0.50 (máximo)
Índice de yodo (g I <sub>2</sub> ·100g <sup>-1</sup> )	102.7	112.7	120 (máximo)
Estabilidad a la oxidación (h)	5.8	1.5	8 (mínimo)

Respecto al perfil de ésteres metílicos de ácidos grasos en ambos biocombustibles, el éster metílico mayoritario en el caso del biodiésel de colza fue el oleato de metilo, con un 61.8%, mientras que para el caso del biodiésel de cártamo fue el linoleato de metilo, con un 75.8% (figura 10.2). Estos resultados concuerdan con otros valores encontrados en la bibliografía para ambos tipos de biodiésel (Mihaela *et al.*, 2013; Ilkiliç *et al.*, 2011; Martínez *et al.*, 2014).



**Figura 10.2.** Perfil de ésteres metílicos de ácidos grasos para biodiésel de colza (a) y cártamo (b).

Hay un amplio campo de conocimiento con respecto a la influencia de la composición del biodiésel en muchas de sus propiedades, tales como la viscosidad o la estabilidad a la oxidación (Knothe y Razon, 2017; Kumar y Sharma 2016; Martínez *et al.*, 2014). Así, las diferencias en composición observadas en la figura 10.2 podrían explicar la diferencia en la estabilidad oxidativa de ambos productos. Si se presta atención al éster metílico de ácido graso mayoritario, el oleato de metilo es monoinsaturado, mientras que el linoleato de metilo presenta dos dobles enlaces conjugados, los cuales son un punto de la estructura molecular muy susceptible de oxidación. Al ser este último el compuesto mayoritario del biodiésel de cártamo, es comprensible la baja estabilidad a la oxidación observada en comparación con el biodiésel de colza.

Consecuentemente, según los datos anteriormente mostrados, queda justificada la adición de antioxidantes. En la figura 10.3 se muestra el efecto del ácido tánico en la estabilidad oxidativa del biodiésel de cártamo, el más inestable desde el punto de vista de la oxidación. El probable mecanismo de acción del ácido tánico es neutralizar radicales libres presentes en la autooxidación del biodiésel (Varatharajan y Pushparani, 2018). Se puede observar un incremento progresivo en la estabilidad a la oxidación hasta los 500 ppm, alcanzándose 2.5 h (expresado mediante el punto de inducción). A mayores concentraciones se observó un descenso en tal estabilidad, sugiriendo un efecto de

prooxidación a altas concentraciones o a determinados valores de pH, como puede ocurrir en algunos antioxidantes naturales (Hagerman *et al.*, 1998; De Sousa *et al.*, 2014).

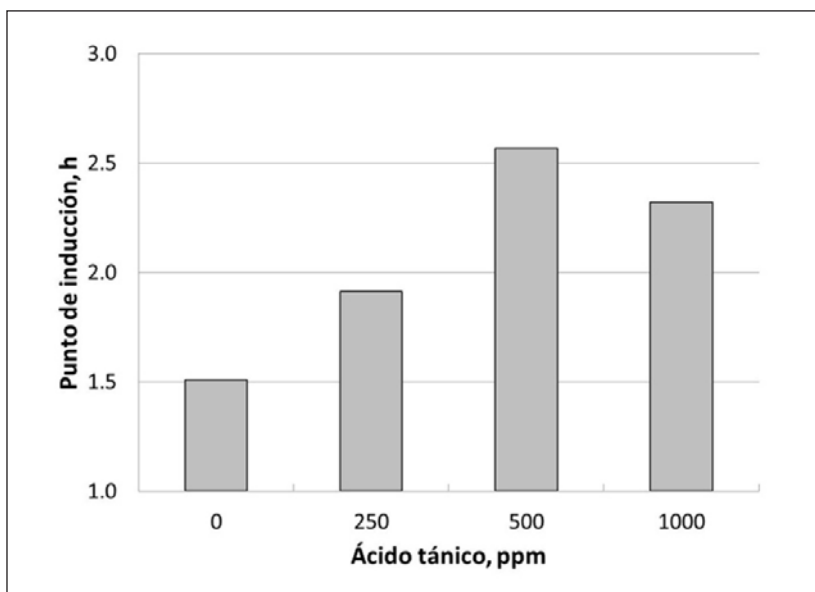


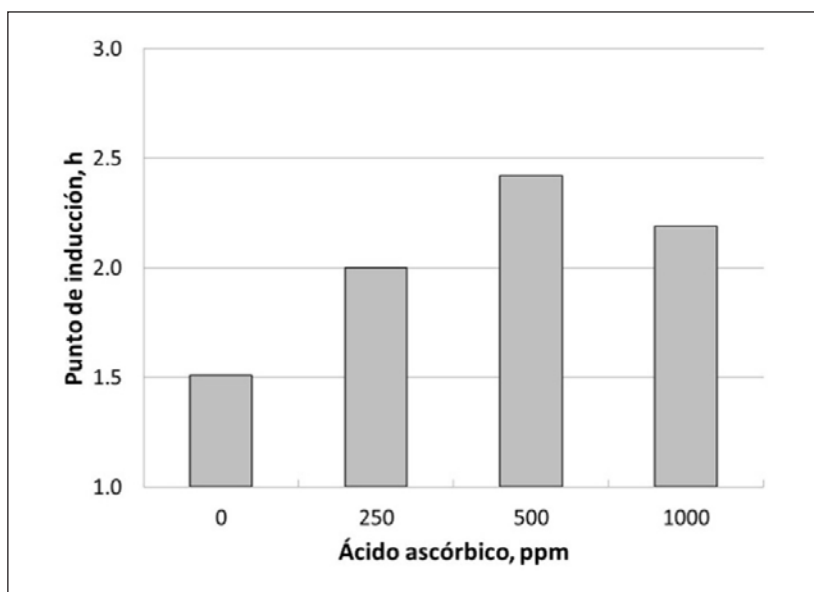
Figura 10.3. Efecto de ácido tánico en la estabilidad a la oxidación del biodiésel de cártamo.

En el caso del ácido ascórbico, su mecanismo de acción estaría enfocado al efecto quelante para retirar metales presentes en el biodiésel que podrían actuar como catalizadores de la autooxidación del biodiésel (Jain *et al.*, 2003).

Al igual que en el caso del ácido tánico, hubo un incremento gradual en la estabilidad a la oxidación con la concentración de ácido ascórbico (ver figura 10.4) hasta las 500 ppm, y después disminuyó. Así, ambos antioxidantes, aun mejorando la estabilidad a la oxidación del biodiésel de cártamo, no llegaron a valores próximos al valor mínimo establecido por la norma. Todo ello es debido, posiblemente, a la elevada proporción de linoleato de metilo en el biodiésel de cártamo, el cual hace insuficientes las proporciones utilizadas de ambos antioxidantes en esta experiencia. En el caso del ácido tánico, parece que la concentración de 500 ppm es límite, a partir de la cual comienza a actuar como prooxidante. Para el ácido ascórbico, el hecho de actuar de que-

lante de los metales presentes en el biodiésel de cártamo parece no ser suficiente frente a la presencia de un componente tan inestable a la oxidación como el linoleato de metilo.

Tanto en los resultados obtenidos para el ácido tánico como el ascórbico, los mismos son inferiores si los comparamos con experiencias previas donde se utilizaron otros antioxidantes como BHA y TBHQ a 1000 ppm, teniéndose estabilidades oxidativas de 4.44 y 5.76 horas, respectivamente, para este mismo biodiésel.



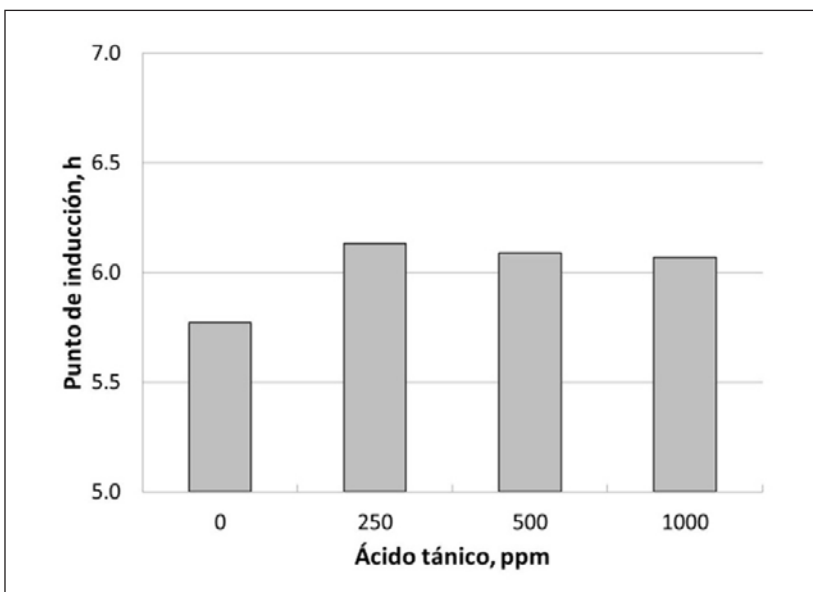
**Figura 10.4.** Efecto de ácido ascórbico en la estabilidad a la oxidación del biodiésel de cártamo.

Para el biodiésel de colza se utilizaron los mismos antioxidantes a las mismas concentraciones; los resultados obtenidos se muestran en las figuras 10.5 y 10.6.

Así, la adición de ácido tánico en biodiésel de colza (figura 10.5) muestra un comportamiento similar al mostrado en el biodiésel de cártamo. Hubo un incremento de la estabilidad a la oxidación hasta los 250-500 ppm de ácido tánico y, a partir de dichos valores, la estabilidad a la oxidación disminuyó ligeramente. Al tratarse de un biodiésel más estable a la oxidación, hubo una mayor aproximación a los valores mínimos de la nor-

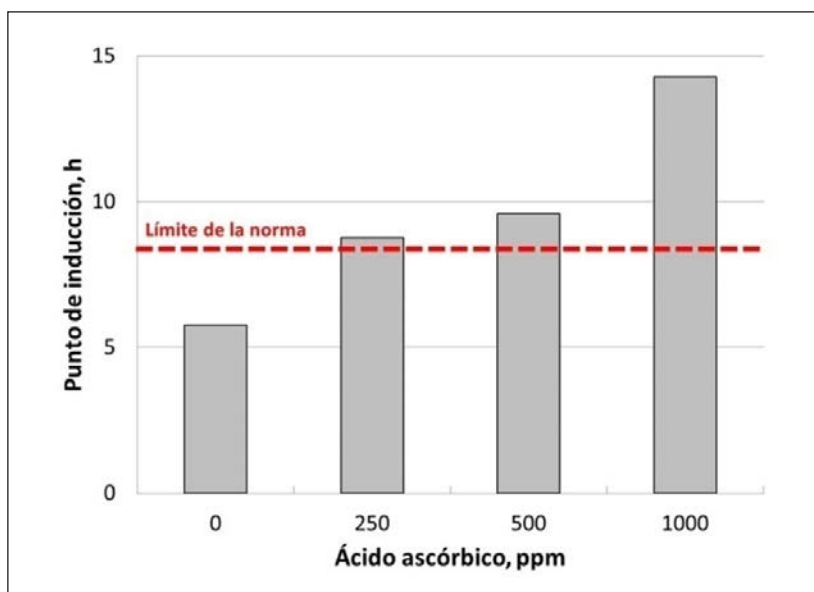
ma, pero no se superó en ningún caso. Así, el incremento fue de alrededor de una hora en comparación con la muestra control, para el valor máximo encontrado a 250 ppm (por encima de las seis horas de punto de inducción). De esta forma, la eficiencia del ácido tánico en el incremento de la estabilidad volvió a ser reducida, y se llegó a mostrar un efecto de prooxidación a altas concentraciones.

Únicamente en el caso de la adición de ácido ascórbico al biodiésel de colza (ver figura 10.6) se pudo cumplir con la norma; se alcanzó gradualmente una mayor estabilidad a la oxidación con la concentración. En este caso, al tratarse de una muestra más estable a la oxidación debido a la mayor proporción de oleato de metilo, el efecto quelante del ácido ascórbico (retirando metales que actúan como catalizador de la oxidación) se puso de manifiesto. Así, algunos autores observaron una mejora de la estabilidad a la oxidación en biodiésel, tal y como sucedió en este caso (Shuster *et al.*, 2018). Al igual que en el caso del cártamo, la comparación con otros antioxidantes ensayados en el laboratorio arrojó estabilidades a la oxidación superiores para BHA y TBHQ a 1000 ppm (12.2 y 17.7 horas, respectivamente).



**Figura 10.5.** Efecto de ácido tánico en la estabilidad a la oxidación del biodiésel de colza.





**Figura 10.6.** Efecto de ácido ascórbico en la estabilidad a la oxidación del biodiésel de colza.

A modo de resumen, la adición de ácido tánico no fue efectiva en la mejora de la estabilidad oxidativa del biodiésel de colza y cártamo, pero no se descartó su uso para muestras con una mayor estabilidad a la oxidación que las aquí estudiadas. No obstante, el uso de ácido ascórbico fue efectivo para el caso del biodiésel de colza, al retirar metales que actúan como catalizadores del biocombustible, lo cual contribuyó a retardar la oxidación del componente mayoritario (el oleato de metilo, más estable que el linoleato de metilo, mayoritario en el biodiésel de cártamo).

## Conclusiones

Las principales conclusiones a las que se llegó en este estudio son las siguientes:

- La calidad del biodiésel obtenido a partir de aceite de colza y cártamo fue, en general, aceptable y de acuerdo con la normativa UNE-EN 14214. Sin embargo, ambos biocombusti-

bles presentaron una baja estabilidad a la oxidación (especialmente para el biodiésel de cártamo), lo cual supone un problema para su almacenamiento, si bien es una característica típica de los biocombustibles obtenidos a partir de aceites vegetales, independientemente del aceite o residuo empleado.

- La composición de ésteres metílicos de ácidos grasos, los FAME, (principales componentes del biodiésel) fue dispar en ambos casos, siendo el linoleato de metilo (altamente inestable frente a la oxidación) el FAME mayoritario en el biodiésel de cártamo, mientras que para el biodiésel de colza el FAME mayoritario fue el oleato de metilo, el cual es más estable. Como consecuencia, el biodiésel de cártamo presentó una estabilidad a la oxidación más reducida en comparación con el biodiésel de colza.
- La efectividad de los antioxidantes naturales a la hora de mejorar la estabilidad a la oxidación de las muestras fue dispar. Por un lado, el ácido tánico no mostró mejoras destacadas al respecto (ni en el biodiésel de cártamo ni en el de colza), siendo peor su efecto a medida que se sobrepasó cierta cantidad límite de antioxidante. Por otra parte, el ácido ascórbico sí presentó un gran efecto en el caso del biodiésel de colza; se superó el límite mínimo (de ocho horas) para su comercialización según la normativa consultada.
- La poca efectividad de ambos antioxidantes en el caso del biodiésel de cártamo podría ser debido al elevado contenido en linoleato de metilo, el cual hace que la estabilidad a la oxidación sea muy baja y se requieran grandes concentraciones de antioxidante, por lo que las proporciones empleadas en este estudio son insuficientes para tal fin.
- En el caso del ácido tánico, parece que hay una concentración límite a partir de la cual actúa como prooxidante, por lo que los tiempos de inducción son menores y, por lo tanto, su adición inviable. Así, su capacidad quelante no sería elevada y la neutralización de radicales libres tampoco sería muy efectiva.
- En el caso del ácido ascórbico, su alta efectividad en el biodiésel de colza pudo ser debida a la retirada de minerales que actúan como catalizadores de la autooxidación. Al tratarse de un biodiésel más estable respecto a la composición de los

FAME, el efecto quelante del ascórbico fue más notorio que en el caso del biodiésel de cártamo.

- Aunque en este estudio se llevó a cabo una valoración de la efectividad del ácido tánico y ascórbico puros, serían necesarios estudios adicionales sobre el efecto de los mismos presentes en extractos naturales a partir de deshechos o productos de la industria agroalimentaria para valorar de una forma más realista la viabilidad y sostenibilidad del uso de antioxidantes naturales de este tipo.
- Así, se debe contemplar el comportamiento de tales antioxidantes naturales en presencia de otros componentes presentes en extractos naturales, donde se pueden dar efectos sinérgicos, aditivos o inhibitorios entre diferentes compuestos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Junta de Extremadura y los fondos FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional) la ayuda económica recibida (GR18150 y IB18028).

## Referencias

- Aransiola, E. F., Ojumu, T. V., Oyekola, O. O., Madzimbamuto, T. F. y Ikhu-Omoregbe, D. I. O. (2014). *A review of current technology for biodiesel production: state of the art*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.014>
- Christensen, E. y McCormick, R. L. (2014). Long-term storage stability of biodiesel and biodiesel blends. *Fuel Processing Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.045>
- De Sousa, L. S., Rodarte De Moura, C. V., De Oliveira, J. E. y Miranda De Moura, E. (2014). Use of natural antioxidants in soybean biodiesel. *Fuel*, 134, 420-428. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.007>
- Delgado, M. A., García-Rico, C. y Franco, J. M. (2014). *The use of rosemary extracts in vegetable oil-based lubricants*. *Industrial crops and products*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.09.021>
- Dunn, R. O. (2005). Effect of antioxidants on the oxidative stability of methyl soyate (biodiesel). *Fuel Processing Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.003>

- Focke, W.W., Van der Westhuizen, I. y Oosthuysen, X. (2016). Biodiesel oxidative stability from rancimat data. *Thermochimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.03.023>
- Gülçin, I., Huyut, Z., Elmastaş, M. y Aboul-Enein, H. Y. Radical scavenging and antioxidant activity of tannic acid. *Arabian Journal of Chemistry*, 3 (1): 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2009.12.008>. 2010
- Hagerman, A. E., Riedl, K. M., Jones, G. A., Sovic, K. N., Ritchard, N. T., Hartzfeld, P. W. y Riechel, T. L. (1998). High molecular weight plant polyphenolics (Tannins) as biological antioxidants. *Journal. Agric. Food. Chem.*, 1 (5), 1887-1892.
- İlkiliç, C., Aydin, S., Behcet, R. y Aydin, H. (2011). Biodiesel from safflower oil and its application in a diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 92 (3), 356-362. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.09.028>
- Jain, S., Sharma, M. P., Sarin, A., Arora, R., Singh, N. P., Sharma, M. P., Malhotra, R. K., Knothe, G. y Dunn, R. O. Effect of metal contaminants and antioxidants on the storage stability of jatropha Curcas biodiesel. *Fuel*, 80 (10), 1271-1275. <https://doi.org/10.1007/s11746-003-0814-x>
- Knothe, G. y Razon, L. F. (2017). Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.08.001>
- Kumar, M. y Sharma, M. P. (2016). Selection of potential oils for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.032>
- Kumar, N. (2017). Oxidative stability of biodiesel: causes, effects and prevention. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.001>
- Martínez, G., Sánchez, N., Encinar, J. M. y González, J. F. (2014). Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl esters distribution. *Biomass and Bioenergy*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.034>
- Mihaela, P., Rathbauer, J., Negrea, M. y Zeller, R. Perspectives of safflower oil as biodiesel source for South Eastern Europe (Comparative study: safflower, soybean and rapeseed). *Fuel*, 111: 114-119. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.012>
- Popović-Djordjević, J., Mustafa Cengiz, Mehmet Sabih Ozer, Cengiz Sarikurcu, Erman Beyzi, Adem Gunes, Selma Buyukkilic Beyzi, et al. (2018). Changes in fatty acid and mineral composition of rapeseed (*Brassica Napus* Ssp. *Oleifera* L.) oil with seed sizes. *Educacion Quimica* 20 (4), 143-169. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.064>

- Qiu, F., Li, Y., Yang, D., Li, X. y Sun, P. (2011). Biodiesel production from mixed soybean oil and rapeseed oil. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.070>
- Rodionova, M. V., Poudyal, R. S., Tiwari, I., Voloshin, R. A., Zhar-mukhamedov, S. K., Nam, H. G., Zayadan, B. K., Bruce, B. D., Hou, H. J. M. y Allakhverdiev, S. I. (2017). Biofuel production: challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.125>
- Saluja, R. K., Kumar, V. y Sham, R. (2016). Stability of biodiesel. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.001>
- Shuster, G., Do Amaral, A. A., Wyzykowski, J., Pianaro Valenga, M. G., Boschen, N. L., Rodrigues Maia, G. A., Pinto Rodrigues, P. R. y Gallina, A. L. (2018). Ascorbic acid as antioxidant for soybean biodiesel. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, 10 (3). <https://doi.org/10.17807/orbital.v10i3.1097>
- UNE (2018). UNE-EN 14214:2013 V2+A1:2018. *Liquid petroleum products. Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and heating applications. Requirements and test methods*.
- Van der Westhuizen, I. y Focke, W. W. (2018). Stabilizing sunflower biodiesel with synthetic antioxidant blends. *Fuel*, 219, 126-131. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.086>
- Varatharajan, K. y Pushparani, D. S. (2018). Screening of antioxidant additives for biodiesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.020>



# Taxonomía de amenazas, vulnerabilidades y buenas prácticas para el desarrollo seguro de software

*Taxonomy of threats, vulnerabilities and good practices for the secure software development*

JOSÉ CARLOS SANCHO NÚÑEZ  
Universidad de Extremadura, Cáceres  
jcsanchon@unex.es

ANDRÉS CARO LINDO  
JOSÉ MÉNDEZ CHAVES  
PABLO GARCÍA RODRÍGUEZ  
Universidad de Extremadura, Cáceres

## Resumen

La efectividad y sofisticación de los ataques cibernéticos actuales ponen de manifiesto la dificultad de desarrollar software de forma segura. Por este motivo, se decide crear un nuevo modelo de desarrollo de software seguro. Este modelo describe diversas actividades de seguridad que abarcan todas las fases del ciclo de vida del software. Una actividad fundamental es la codificación segura. Para ayudar en esta tarea, se presenta la composición de una taxonomía de amenazas, vulnerabilidades y buenas prácticas de desarrollo seguro. El objetivo es apoyar y facilitar a los desarrolladores para construir software como un producto seguro. La taxonomía extrae información de fuentes especializadas y con alto prestigio. Se identifican amenazas de seguridad y se relacionan con las posibles vulnerabilidades. La información de las vulnerabilidades se extiende en conceptos básicos, contramedidas y ejemplos de código seguro e inseguro. Los desarrolladores podrán consultar de forma integral esta taxonomía para implementar código de forma no solo funcional, sino también seguro.

**Palabras clave:** ciberseguridad, taxonomía, amenaza, vulnerabilidad, software seguro.

## Abstract

The effectiveness and sophistication of current cyberattacks reveals the difficulty of developing secure software. This is the reason to propose a new Secure Software Development Model. This new model describes several security activities which cover all phases of the software development life cycle. Being the secure coding a key activity, the approach of a taxonomy of threats, vulnerabilities and good practices for secure development is presented. The goal is to support and facilitate developers to build software as a secure product. The taxonomy extracts information from specialized and high prestige sources. Security threats are identified and related to potential vulnerabilities. Vulnerability information extends into basic concepts, countermeasures and examples of secure and insecure code. Developers will be able to consult in an integral way this taxonomy to implement code that is not just only functional, but also secure.

**Keywords:** cybersecurity, taxonomy, threat, vulnerability, secure software, software development.

## Introducción

Hoy en día las empresas tienen entre sus estrategias ir en pro del desarrollo sostenible. Todas ellas toman como base y gran aliada a la tecnología. Hacen uso de herramientas software para el desarrollo de capacidades e incluso para los reportes de sostenibilidad.

En el desarrollo del software, el escenario se presenta alarmante, ya que cada segundo se producen multitud de ataques cibernéticos. En los últimos tiempos, se han incrementado los ataques dirigidos a sistemas críticos que afectan al consumo humano, desconfiguración de infraestructuras críticas o hacia sistemas SCADA encargados de controlar o supervisar procesos industriales. También son preocupantes los ataques en campos más genéricos como el sector bancario o el IoT (*Internet of things*).

Posibles consecuencias de estos tipos de ataques son la alteración de parámetros de la composición y depuración del agua, la manipulación de redes eléctricas, la alteración de objetos interconectados en hogares y ciudades, así como las graves consecuencias en empresas, bancos u otras instituciones financieras.

La herramienta online Fortinet Threat Map (FortiGuard, 2019) nos permite observar los ciberataques que se están produciendo en tiempo real. En la figura 11.1 observamos un fragmento del mapamundi en el que se aprecian los ataques que su-



fre Estados Unidos, cuyo origen proviene de China. Es frecuente que las grandes potencias mundiales reciban continuos intentos de ser perjudicados, sobre todo la conocida zona de Silicon Valley, donde se ubican los gigantes tecnológicos.



**Figura 11.1.** Ataques informáticos en tiempo real monitorizados por Fortinet Threat Map.

El incremento en la sofisticación de los ataques está poniendo en jaque a las empresas. La explotación de vulnerabilidades les produce un alto impacto y provoca graves pérdidas económicas, que afectan gravemente a sus procesos de negocio. Por otro lado, las empresas que desarrollan software ponen en riesgo su reputación en el caso de que los sistemas que desarrollen sean vulnerados con éxito.

Pese a que, muchas veces, las causas exactas y el origen de los ataques no se conocen con exactitud, por lo general tienen que ver con la falta de seguridad en el proceso de desarrollo del software. Las empresas que desarrollan esperan hasta la fase de pruebas para identificar y solventar vulnerabilidades, aun estando demostrado que encontrar fallos de seguridad en fases tan avanzadas de los proyectos aumenta exponencialmente el coste de su resolución (National Institute of Standards and Technology, 2002).

Así, con el objetivo de facilitar el trabajo a los profesionales de construir software de forma segura se presenta la composición de

una taxonomía de amenazas, vulnerabilidades y buenas prácticas para el desarrollo de software seguro que se encuentra alineada con un modelo de desarrollo de software seguro, propio e implantado en una empresa consultora de servicios tecnológicos.

## Justificación

Una de las grandes necesidades detectadas para garantizar mayor seguridad en el software desarrollado es la falta de actividades de seguridad que se ejecuten de forma sistemática en todas las fases del ciclo de vida del software.

En trabajos anteriores se analizan los principales modelos de desarrollo de software seguro para detectar sus similitudes (Sancho Núñez, Caro Lindo y García Rodríguez, 2016) y proponer un nuevo modelo de desarrollo de software seguro. Posteriormente, mediante una metodología planificada en el tiempo se lleva a cabo su implantación a nivel empresarial en un contexto real (Sancho Núñez *et al.*, 2017). En la figura 11.2 se detalla el modelo comentado, basado en una metodología sistemática y planificada. Está formado por catorce actividades de seguridad agrupadas en cuatro áreas de desarrollo.



Figura 11.2. Modelo de desarrollo de software seguro.

Con la experiencia de la aplicación de este modelo en varios proyectos de clientes reales, se sigue trabajando para mejorar operativamente las diversas actividades de seguridad centradas

en la construcción del software. Una de las mejoras realizadas simplifica el proceso de obtención de requisitos o historias de seguridad con la implementación de una herramienta (Sancho Núñez *et al.*, 2018). Esta cuestión se lleva a cabo en la primera actividad del ciclo de vida del software, siendo fundamental que se inspeccione la seguridad del software desde fases tempranas.

Debido a que no se realizan por las mismas personas, es preciso que se produzca una trazabilidad y conexión entre todas las actividades del ciclo de vida. Los requisitos de seguridad, las amenazas y las vulnerabilidades se identifican por separado y no existe una relación entre ellas. Por este motivo, la taxonomía que se presenta construye una línea conectora que se extiende durante todo el desarrollo del software y que comprueba el estado de los aspectos de seguridad que afectan al software. Esta conectividad entre las distintas fases debe llegar hasta la codificación del software, por ello se presenta también un conjunto de unas buenas prácticas de codificación segura.

## Metodología

Para construir la taxonomía, se toman como base las múltiples fuentes especializadas y consideradas de prestigio, como OWASP, 2017; Security Knowledge Framework, 2019; Carnegie Mellon University, 2019; en las cuales se realiza una búsqueda, extracción y clasificación de información más relevante relacionada con amenazas, vulnerabilidades y ejemplos de código.

Inicialmente, se parte de los patrones de diseño seguro, es decir, de la forma reutilizable de desarrollar software seguro, como, por ejemplo: validación de entradas, política de control de acceso (autenticación), administración de sesiones, privilegios y roles (autorización), manipulación y registro de errores, etc.

Posteriormente, se han estudiado y relacionado las vulnerabilidades más comunes en la actualidad, denominado top 10 de OWASP. Este listado, que se actualiza cada tres años, alberga los diez riesgos más críticos en aplicaciones web. En la figura 11.3 podemos observar de manera desglosada el tipo de vulnerabilidad más explotada en la actualidad. La información de las vulnerabilidades se extiende en conceptos básicos, contramedidas y ejemplos de código seguro e inseguro.

Por último, la vulnerabilidad estudiada se asociada a una buena práctica de desarrollo y al código de ejemplo seguro. De esta forma los desarrolladores podrán aprender cómo deben construir código fuente sin cometer errores y de forma segura.

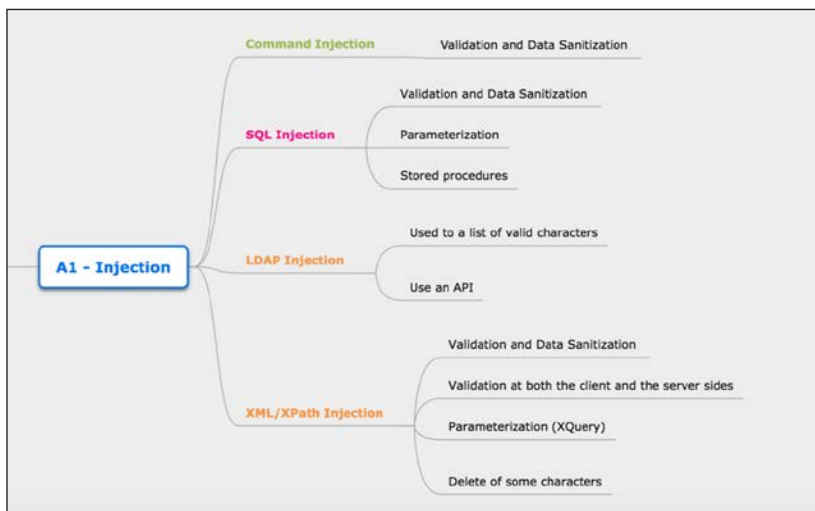


Figura 11.3. Ejemplo de vulnerabilidad asociada a sus buenas prácticas.

## Resultados

Con el objetivo de dar una idea sencilla de la composición de la taxonomía construida se presenta un ejemplo sencillo que ayude al entendimiento. Se toma como base el patrón de diseño «validación de entradas» que es la prueba que se realiza para verificar que cualquier entrada suministrada por un usuario o aplicación es correcta y no tiene un uso malintencionado.

Este patrón de diseño se encuentra asociado a la vulnerabilidad «inyección de código (A1)», que consiste en introducir, dentro de los campos de entrada de aplicación, sentencias específicas que intenten engañar al sistema que lo interpreta para extraer información sensible del sistema examinado. Para destacar su importancia es preciso señalar que a través de una inyección SQL podríamos extraer la estructura de una base de datos y toda la información almacenada en ella. En la tabla 11.1 se asocia el patrón de diseño a la vulnerabilidad y subtipos que pretende mitigar.

**Tabla 11.1.** Ejemplo de conexión del patrón de diseño seguro, la vulnerabilidad y sus tipos

Patrón de diseño	Vulnerabilidad	Tipos
Validación de entradas	Inyección de código (A1)	SQL
		No SQL
		OS
		LDAP
		XML/XPath

Se presenta el listado de buenas prácticas que los desarrolladores tendrán a su disposición para evitar la vulnerabilidad denominada «inyección de código (A1)»:

- Crear una rutina de validación de datos de entrada centralizada para la aplicación.
- Realizar todas las validaciones de datos en el servidor.
- Identificar todas las fuentes de datos y clasificarlos como confiables o no confiables.
- Validar todos los datos provenientes de fuentes no confiables (por ejemplo, bases de datos, secuencias de archivo, etc.).
- Especificar sets de caracteres apropiados, tales como UTF-8, para todas las fuentes de entrada.
- Validar todos los datos brindados por el cliente antes de procesarlos, incluyendo todos los parámetros, URL y contenidos de cabeceras HTTP (por ejemplo, nombres de *cookies* y valores). Asegurarse de incluir *post backs* automáticos desde JavaScript, Flash u otro código embebido.
- Verificar que los valores de la cabecera contengan solo caracteres ASCII tanto en solicitudes como en respuestas.
- Validar caracteres considerados peligrosos como: < > " ' % ( ) & + \ / \\'\".
- Validar datos redireccionados de otra aplicación que no es la de origen.
- Validar tipos de datos no esperados por la aplicación.
- Validar rangos de los datos introducidos en la aplicación.
- Validar longitud de los datos introducidos en la aplicación.
- Validar las entrada con una lista «blanca» que contenga una lista de caracteres aceptados, siempre que sea posible.

- Comprobar si hay bytes nulos (%00).
- Comprobar si hay caracteres de nueva línea (%0d, %0a, \r, \n).
- Comprobar si hay caracteres de alteraciones de ruta «punto, punto, barra (../ o ../\%c0%ae%c0%ae/).
- Verificar que todos los fallos terminan con el rechazo del dato de entrada.

Por último, se presentan ejemplos del código para crear consultas parametrizadas de forma segura y no vulnerable al tipo de ataque de inyección SQL.

```
String query = "SELECT account_balance FROM user_data WHERE
user_name = ? ";
PreparedStatement pstmt = connection.prepareStatement( query );
pstmt.setString( 1, custname);
ResultSet results = pstmt.executeQuery( );
```

Se realiza la misma dinámica para el resto de patrones de diseño seguro especificados y sus posibles vulnerabilidades.

## Conclusiones

Es evidente que desarrollar software de forma segura es una tarea compleja, ya que algo que hoy era seguro, puede no serlo mañana. El avance de la tecnología y la sofisticación de los ciberataques ha provocado que la seguridad en la construcción del software se convierta en un desafío para las empresas desarrolladoras.

Esta contribución presenta una taxonomía que enlaza e interconecta amenazas o patrones de diseño seguro, vulnerabilidades y buenas prácticas de codificación que a su vez incluyen ejemplos de código seguro. La taxonomía en cuestión facilita el trabajo de los desarrolladores al proporcionarles información específica para desarrollar de forma segura, de manera centralizada y organizada en función de la amenaza y la vulnerabilidad que pretenden evitar.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida por parte de la Junta de Extremadura (Fondo Europeo de Desarrollo Regional), de la Consejería de Economía e Infraestructuras (Proyecto GR18138) y de ViewNext, empresa del grupo IBM España.

## Referencias

- Carnegie Mellon University (2019). Software Engineering Institute. <https://wiki.sei.cmu.edu/confluence/display/seccode/SEI+CERT+Coding+Standards>.
- Fortiguard (2019). *Fortinet threat map*.
- National Institute of Standards and Technology (2002). *The economic impacts of inadequate infrastructure for software testing. Quality*. <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/director/planning/report02-3.pdf>.
- OWASP (2017). *OWASP Top 10. The ten most critical web application security risks*. [https://www.owasp.org/images/7/72/OWASP\\_Top\\_10-2017\\_%28en%29.pdf.pdf%0Ahttps://www.owasp.org/images/7/72/OWASP\\_Top\\_10-2017\\_%28en%29.pdf.pdf%0Ahttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:OWASP+Top+10+-2010#1](https://www.owasp.org/images/7/72/OWASP_Top_10-2017_%28en%29.pdf.pdf%0Ahttps://www.owasp.org/images/7/72/OWASP_Top_10-2017_%28en%29.pdf.pdf%0Ahttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:OWASP+Top+10+-2010#1).
- Sancho Núñez, J. C., Caro Lindo, A., Fondón, L. y Félix de Sande, J. A. (2018). Herramienta para la identificación de requisitos de seguridad en un modelo de desarrollo seguro. *Reunión Española sobre Criptología y Seguridad de la Información (RECSI)* (S.l.: s.n., pp. 92-95).
- Sancho Núñez, J. C., Caro Lindo, A. y García Rodríguez, P. (2016). Análisis de metodologías de desarrollo de software seguro. *Jornadas Nacionales de Investigación en Ciberseguridad (JNIC)* (S.l.: s.n., pp. 42-47).
- Sancho Núñez, J. C., Caro Lindo, A., García Rodríguez, P. y Félix de Sande, J. A. (2017). Metodología de implantación empresarial de un modelo de desarrollo de software seguro. *Jornadas Nacionales de Investigación en Ciberseguridad (JNIC)* (S.l.: s.n., pp. 128-133). <http://jornadasciberseguridad.riasc.unileon.es/>.
- Security Knowledge Framework (2019). *Security knowledge framework*.





# Caracterización de contaminantes emergentes y capacidad de remoción en aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones rurales con tecnología de humedales artificiales

*Characterization of emerging contaminants and removal capacity in urban wastewater of small rural areas using the artificial wetland technology*

MARÍA ISABEL FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

PEDRO TOMÁS MARTÍN DE LA VEGA MANZANO

MARÍA DEL ROSARIO PALOMO MARÍN

Consortio para la Gestión de los Servicios Medioambientales  
de la provincia de Badajoz

MIGUEL ÁNGEL JARAMILLO MORÁN

FÁTIMA FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura

## Resumen

Se presenta en este capítulo el diseño y funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales que emplea la tecnología de humedales artificiales y que se ha implementado para tratar los residuos procedentes de un centro de investigación animal. Esta tecnología se basa en el uso de un tipo de plantas acuáticas (macrofitas) que proporcionan una superficie para la formación de películas bacterianas, por lo que facilitan la filtración y la adsorción de los contaminantes del agua residual. De todos los contaminantes que la planta recibe se estudian, en este caso, algunos de los denominados contaminantes emergentes, es decir, aquellos agentes químicos de diversa naturaleza que están presentes en concentraciones traza. En concreto, se analiza la eficiencia

depurativa de la planta en la eliminación de antibióticos, herbicidas, antiparasitarios y analgésicos. La planta proporciona unas tasas de eliminación muy altas para algunos de estos compuestos (analgésicos y antibióticos), aunque no son tan altas con los otros dos (herbicidas y antiparasitarios). Este hecho hace que este tipo de plantas pueda ser una opción muy válida para su posible instalación en pequeñas poblaciones del ámbito rural.

**Palabras clave:** tecnología de humedales, tratamiento de aguas.

### Abstract

The design and operation of a wastewater treatment plant that uses artificial wetland technology, and has been implemented to treat wastewater from an animal research center, is presented in this work. This technology is based on the use of a type of aquatic plants (macrophytes) that provide a surface for the formation of bacterial films, which facilitate filtration and adsorption of pollutants from the wastewater. Among the pollutants the plant receives, some of the so-called emerging contaminants, that is to say, those chemical agents of diverse nature that are present in trace concentrations, have been studied in this case. Specifically, the plant removing rates of antibiotics, herbicides, antiparasitics and analgesics have been analyzed. The plant provides very high removing rates for some of these compounds (analgesics and antibiotics) although they are not so high with the other two (herbicides and antiparasitics). This fact makes this type of plant a very valid option for its possible installation in small towns in rural areas.

**Keywords:** wetland technology, waste water treatment

## Introducción

El agravamiento de la crisis climática, la sobrexplotación de los recursos hídricos y el propio avance en el desarrollo de técnicas analíticas más sensibles han puesto el foco en nuevos parámetros contaminantes presentes en las masas de agua. Así, en los últimos tiempos, el estudio de contaminantes emergentes en el medio acuático está recibiendo una creciente atención. El término *contaminante emergente* (CE) comprende una amplia gama de compuestos de distinto origen y naturaleza química, que engloba desde productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, agentes tensoactivos, hasta plastificantes y aditivos industriales, los cuales están presentes en el agua en concentraciones trazas. Estas bajas concentraciones y la diversidad de estos complican su

detección y eliminación (Gorito, Ribeiro y Almeida, 2017). Numerosos estudios muestran que la exposición a ciertos contaminantes, incluso a bajas concentraciones, puede causar importantes consecuencias en peces y otras especies acuáticas (Raghav et al., 2013). En cuanto al ser humano, la presencia de los CE en el agua provoca importantes problemas de salud como resultado del carácter persistente de los mismos en el agua. De esta forma, el incremento de la población mundial, unido al incremento de la huella hídrica del sistema productivo actual, ha supuesto un aumento de la demanda de agua destinada al uso doméstico, agrícola e industrial, dando lugar a un incremento en la presencia de CE en el medio acuático (Agarwal, 2005). Igualmente, dicho incremento de demanda de agua para abastecimiento supone un incremento de contaminación en el siguiente paso del ciclo del agua: el saneamiento y la depuración. La red de conexión de cualquier aglomeración urbana es su red de saneamiento, la cual se encarga de conectar la totalidad de industrias y hogares, así como de la recogida de arrastres de agua de lluvia y baldeos de calles a un único punto, la depuradora de aguas residuales. De esta forma, esta infraestructura, en su día a día, recibe todo tipo de contaminación orgánica, claramente identificada, estando diseñada para reducir el impacto de dicha contaminación en el medio acuático. La aparición de dichos CE supone un nuevo reto, puesto que no basta con identificarlos, sino que es preciso tener clara la capacidad de remoción de las tecnologías depurativas actuales y aplicar nuevos tratamientos para conseguir que los cada vez más presentes CE sean retenidos y eliminados del agua en dichas depuradoras.

Así, la investigación sobre el destino de los contaminantes emergentes en agua y el desarrollo de nuevas tecnologías para su eliminación son cruciales para realizar una buena gestión de los recursos hídricos.

## Normativa

Con el objetivo de mejorar la calidad del medio ambiente acuático, se adoptó en el año 2000 la Directiva Marco del Agua (DMA) (Directiva 2000/60/CE), la cual establece un marco comunitario de actuación en la política de aguas con el propósito de lograr un buen estado ecológico y químico de las aguas superficiales. Dicha directiva supone un nuevo marco normativo a nivel euro-

peo, hasta el punto de que se la denomina «directiva madre», puesto que su aplicación ha generado la aparición de nuevas directivas y la evaluación de directivas anteriores, a las que se denomina «directivas hijas». El reflejo de esta directiva en el sistema legal español se encuentra en el Real Decreto Legislativo 1/2001 por el que se aprueba el texto refundido de la Ley del Agua. Por tanto, en el año 2000, desde el punto de vista normativo, empieza a tomarse conciencia del concepto de contaminante emergente, identificado en estas directivas y en su reflejo en el sistema legal español como «sustancia prioritaria» (SP), definida como «sustancia con riesgo de toxicidad, persistencia y bioacumulación para el medio acuático comunitario». No obstante, hasta que no se publica la Decisión Ejecutiva 2455/2011/CE no aparece la primera lista que identifica 33 sustancias prioritarias, y se marca en dicha lista cuáles de ellas ya eran definidas como peligrosas; por tanto, es aquí cuando se identifican 33 sustancias como contaminantes emergentes. La mayor parte eran compuestos orgánicos, aunque también se incluyen metales y compuestos organometálicos tóxicos. Si bien hasta la publicación de la Directiva hija 2008/105/CE no se establecen normas de calidad ambiental (NCA) para estas sustancias prioritarias, entendiendo NCA como la concentración de un determinado contaminante o grupo de contaminantes en el agua, los sedimentos o la biota, que no debe superarse en aras de la protección de la salud humana y el medioambiente, estableciendo que dichos valores paramétricos se definen por contaminantes como media anual o como concentración máxima admisible, siendo la unidad métrica de referencia  $\mu\text{g/l}$ . Igualmente, en esta directiva se establece la necesidad de incluir una lista de sustancias que requieren un mayor estudio para ser definidas como sustancia prioritaria; se establecen un total de 10 sustancias que observar. Esta directiva hija tiene su reflejo en el sistema legal español a través del RD 60/2011.

Esta lista de sustancias prioritarias fue actualizada por una nueva directiva hija, la Directiva 2013/39/UE, en la que se amplía la lista de 33 sustancias prioritarias a 45 y se recrudescen las NCA; asimismo, se constata la necesidad de definir una lista de observación, es decir, de identificación de sustancias que deben ser estudiadas con detenimiento para ser incluidas como sustancias prioritarias. Esta lista de observación se diferencia de la ya presentada en la Directiva 2008/15/CE en que ahora se definirán

los métodos analíticos más apropiados para su estudio. Esta lista aparece en la Decisión Ejecutiva 2015/495/UE, en la que se indican la matriz de seguimiento (agua, sedimentos o biota), los posibles métodos analíticos que no generasen costes excesivos y los límites aceptables de detección del método. De esta forma, esta evolución en las directivas se registra en el sistema legal español a través del RD 817/2015, siendo la principal novedad de este real decreto el establecimiento de una lista de 16 sustancias, denominadas preferentes, de especial riesgo para el territorio español.

El último paso en lo que a normativa se refiere se encuentra en la Decisión Ejecutiva 2018/840/UE, en la cual se actualiza la lista de observación, retirando tres sustancias por considerar que se disponía de suficiente información, también se eliminan otras dos sustancias por considerar que no se han aportado datos suficientes en sedimentos. A pesar de eliminarlos de la lista, se indica que se realizará un análisis de investigación más exhaustivo. Por el contrario, se introducen tres nuevas sustancias que analizar, dos antibióticos y un insecticida. No obstante, no se ha realizado una trasposición al sistema legal español de esta decisión ejecutiva.

Como conclusión, cabe destacar que existe un marco normativo de regulación de contaminantes prioritarios o emergentes a nivel europeo y nacional. El control de estos se centra en la definición de la calidad de las masas de agua, buscando conseguir el buen estado químico de las mismas. Al respecto, España no cumple con los objetivos establecidos en la DMA en cuanto al buen estado de las masas, si bien actualmente nos encontramos inmersos en una prórroga para conseguir estos objetivos, cuya fecha límite es el año 2027. De esta forma, actualmente se dibuja un escenario muy centrado en identificar contaminantes emergentes y evaluar la capacidad de remoción de estos con tecnologías sostenibles, no siendo parámetros de establecimiento de sanción por incumplimiento de las NCA definidas.

## Origen, destino y efectos sobre el medioambiente de los contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes llegan al medioambiente a través de diversas fuentes (Burkhardt, 2011; Ribeiro *et al.*, 2015); entre ellas, efluentes industriales procedentes de procesos de fabricación. Sin embargo, la principal fuente de entrada de estos com-

puestos en el medioambiente acuático es por medio de las aguas residuales, portadoras de la contaminación producida por el hombre debido al uso de productos para el cuidado personal, efluentes de centros hospitalarios o productos farmacéuticos que son excretados en la orina y las heces, y las industrias conectadas a las redes de saneamiento. Por otra parte, la agricultura y la ganadería son otra importante fuente de contaminación difusa como consecuencia de la escorrentía o como resultado de procesos de infiltración que acaban en los sistemas de saneamiento o en las masas de aguas superficiales y subterráneas que terminan llegando al ciclo del agua. La tabla 12.1 muestra un resumen de los contaminantes emergentes más comunes.

**Tabla 12.1.** Relación de contaminantes emergentes más comunes

Fármacos	Antibióticos
	Analgésicos y antiinflamatorios
	β-bloqueantes
	Esteroides y hormonas
Productos de cuidado personal	Parabenos
	Perfumes
Tensoactivos	Sulfonatos
	Alcanolamidas
	Alquilfenoles
Aditivos y agentes industriales	Benzotriazoles
	Agentes quelantes
Drogas de abuso	Cocaínicos
	Opiáceos
	Opioides

## Tratamientos de eliminación de contaminantes emergentes. Humedales artificiales

Las bajas concentraciones y la diversidad de los CE complican los procesos de detección y eliminación (Coquery *et al.*, 2005);

de esta forma, crean problemas en los sistemas de tratamiento convencionales de agua residuales (Luo *et al.*, 2014). Actualmente, las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) convencionales no son suficientemente eficientes para la eliminación de la mayoría de los CE. Por esta razón es importante identificar y evaluar la eficiencia de otras tecnologías para el tratamiento de aguas residuales con el fin de proponer alternativas que permitan minimizar la presencia de contaminantes con un bajo coste económico, energético y ambiental. En este sentido, los sistemas de depuración extensivos mediante humedales artificiales se presentan como una buena alternativa para la eliminación de CE en afluentes de aguas residuales.

Los humedales artificiales son sistemas pasivos de depuración diseñados para potenciar la descomposición de los materiales degradables contenidos en el agua residual con mecanismos que se dan de forma espontánea en la naturaleza, tanto a nivel físico-químico como biológico, y actualmente son considerados una alternativa como sistema de depuración para poblaciones rurales cuyas principales actividades económicas son la agricultura y la ganadería. El afluente recibe, normalmente, un pretratamiento, pasando a continuación a través del humedal. El carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por las siguientes peculiaridades:

- El confinamiento del humedal se construye mecánicamente y se impermeabiliza para evitar pérdidas de agua al subsuelo.
- Se emplean sustratos diferentes al terreno original para el enraizamiento de las plantas.
- Se elige el tipo de plantas que van a colonizar el humedal.

La depuración de las aguas residuales tiene lugar al hacerlas circular a través de las zonas húmedas artificiales, en las que se desarrollan procesos físicos, químicos y biológicos. Así, la tecnología de humedales artificiales actúa como un complejo ecosistema en el que participan los siguientes elementos:

- El agua que hay que tratar, que circula a través del sustrato filtrante o de la vegetación.
- El sustrato, que tiene la finalidad de servir de soporte a la vegetación y de permitir la fijación de la población microbiana,

que va a participar en los procesos de eliminación de los contaminantes presentes en las aguas a tratar.

- Las plantas emergentes acuáticas (macrofitas), que proporcionan superficie para la formación de películas bacterianas, por lo que facilitan la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual que contribuyen a la oxigenación del sustrato y a la eliminación de los contaminantes del agua.

Existen diferentes variedades de especies vegetales que pueden ser utilizadas como sistema de depuración. La selección de estas especies se realiza teniendo en cuenta el clima de la zona y su capacidad de adaptación a condiciones climatológicas extremas, la tolerancia y la capacidad de asimilación de altas concentraciones de contaminantes.

Los sistemas de depuración utilizando humedales artificiales presentan una serie de ventajas: sistemas naturales integrados en el medio ambiente, costes de instalación muy inferiores a los de los sistemas de depuración convencionales, bajos costes de mantenimiento y consumo de energía reducido o nulo.

Los humedales artificiales se clasifican en dos tipologías en función del modelo de circulación del agua: superficial o subterránea. En los humedales artificiales de flujo superficial o flujo libre (*surface flow wetlands* –SFW– o *free water surface wetlands* –FWS–), el agua que hay que tratar circula por encima del sustrato, mientras que en los humedales artificiales de flujo subsuperficial (*subsurface flow wetlands* –SSF–, o *vegetated submerged beds* –VSB–), el agua recorre el humedal subterráneamente, a través de los espacios intersticiales del lecho filtrante.

Actualmente existen importantes y reconocidos estudios que consideran los humedales artificiales como una solución para la eliminación de contaminantes emergentes en aguas residuales (Luo *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014; Xiaoyan *et al.*, 2015).

En este trabajo se presentan los humedales artificiales como sistema de depuración para la eliminación de contaminantes emergentes en pequeñas poblaciones (< 2000 habitantes equivalentes) de áreas rurales y se aporta la combinación de dichos sistemas humedales con un tratamiento anaerobio de flujo ascendente que amplíe la capacidad natural del humedal para reducir el contenido de la contaminación que recibe.



## Mapa depurativo en Extremadura. Un caso de estudio: planta de tratamiento instalada en la Fundación CCMIJU

En España, unos 6000 municipios de los aproximadamente 8000 existentes cuentan con menos de 2000 habitantes. En el caso de Extremadura, en la provincia de Cáceres, de las 219 poblaciones existentes, 185 poseen menos de 2000 habitantes y Badajoz cuenta con 185 poblaciones, de las cuales 92 poseen menos de 2000 habitantes. Actualmente, estas pequeñas aglomeraciones son las que presentan más carencias en el tratamiento de sus aguas residuales. Esto, unido a que estas poblaciones rurales se encuentran aisladas desde el punto de vista geográfico y a que la principal actividad económica en la mayor parte de ellas es la agricultura y la ganadería, hace que sean los humedales artificiales una alternativa eficiente como sistema de depuración de sus aguas residuales para la eliminación de nutrientes, materia orgánica y contaminantes emergentes. Igualmente, en lo que respecta a contaminantes emergentes, las pequeñas poblaciones extremeñas, por su propia idiosincrasia (población envejecida con un tejido industrial basado en agricultura y ganadería), se convierten en los nichos de investigación perfectos para identificar contaminantes emergentes y evaluar su impacto en las masas de agua, puesto que el efluente de sus aguas residuales a las masas de agua de bajos caudales hidrológicos implica un fuerte impacto ambiental.

Este estudio se centra en la planta de tratamiento con humedales artificiales como sistema de depuración instalada en la Fundación Centro de Cirugía de Mínima Invasión Jesús Usón (CCMIJU). La Fundación CCMIJU es una institución multidisciplinar dedicada a la formación e investigación de técnicas quirúrgicas mínimamente invasivas. Para ello cuenta en sus instalaciones con varios animalarios para albergar tanto a la población permanente como flotante de animales de diferentes especies (fundamentalmente cerdos y ovejas) destinados a la investigación. En este sentido, el agua residual de este centro recoge los efluentes procedentes del animalario y las aguas urbanas procedentes del propio centro, representando en gran medida un ejemplo de pequeña población con aporte de agua agroganadera

para una población de aproximadamente 400 habitantes equivalentes. Por tanto, esta planta recibe una alta carga de contaminación, especialmente de purines y de operaciones de limpieza del centro. La figura 12.1 muestra la planta de tratamiento localizada en el CCMIJU.

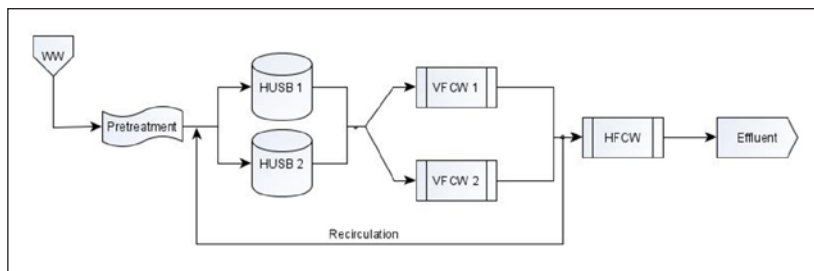


**Figura 12.1.** Planta de tratamiento con humedales artificiales instalada en el CCMIJU en Cáceres.

## Descripción de las instalaciones

La planta consta de una primera etapa de pretratamiento con el fin de eliminar las partículas de mayor tamaño y arena. A continuación, el agua residual se bombea a dos digestores anaerobios de flujo ascendente (HUSB) que trabajan en paralelo con un volumen total de  $50 \text{ m}^3$ , donde se realiza un tratamiento primario con el fin de retener los sólidos en suspensión, eliminar compuestos difícilmente degradables en etapas posteriores y realizar la desnitrificación de los nitratos aportados en la recirculación. El tratamiento secundario se lleva a cabo en un sistema híbrido compuesto por dos humedales de flujo subsuperficial vertical (VFCW) de unos  $285 \text{ m}^2$  en paralelo, que trabajan alternativamente durante periodos de 3,5 días con el fin de evitar obstrucciones. Seguidamente, el agua pasa a un humedal de flujo subsuperficial horizontal (HFCW) de  $105,6 \text{ m}^2$  de superficie. En ambos humedales se plantaron *Phragmites Australis*. A la salida del humedal vertical, hay un sistema de recirculación que bombea

de nuevo agua hacia el digestor con el fin de aumentar los rendimientos en la depuración de las aguas residuales (Fernandez-Fernández *et al.*, 2020). La figura 12.2 muestra un esquema simplificado de la planta de tratamiento.



**Figura 12.2.** Diagrama de la planta de tratamiento instalada en el CCMIJU.

### Toma de muestras y cálculos de rendimientos de eliminación de contaminantes

La planta de tratamiento fue monitorizada de julio de 2018 a marzo de 2020. Las muestras se tomaron semanalmente a la entrada y a la salida de la planta durante todo el periodo de estudio. En total fueron analizados 15 contaminantes emergentes para cada una de las muestras pertenecientes a herbicidas, antibióticos, analgésicos y antiparásitos.

Para la selección de contaminantes emergentes se han considerado los de mayor peso en la actividad de las pequeñas poblaciones, teniendo en cuenta que en las corrientes que han sido observadas, entrada de agua residual y agua depurada, pudiesen medirse dentro de los límites de detección de las técnicas empleadas. En este sentido, los contaminantes emergentes de los identificados en la lista de observación y en la lista de sustancias prioritarias para los que se ha previsto que en las corrientes de agua residual de entrada fuesen a aparecer en concentraciones por debajo del límite de detección no se han considerado para su seguimiento en el presente trabajo, puesto que no se podrían registrar y calcular los rendimientos con calidad por parte de las técnicas de medición.

La técnica analítica utilizada para el análisis de los contaminantes emergentes fue la cromatografía líquida acoplada a la espectrometría de masas. Esta técnica combina la cromatografía de

líquidos como técnica de separación y la espectrometría de masas como técnica de detección, identificación y cuantificación para compuestos orgánicos (Hoffmann y Stroobant, 1999; Di Corcia y Nazzari, 2002). La espectrometría de masas se basa en la ionización de las moléculas y en la separación y registro de los iones producidos según su relación masa/carga en un sistema a vacío. Los iones que llegan al detector producen una señal eléctrica que es amplificada y procesada, dando lugar a un espectro de masas (Hoffmann y Stroobant, 1999).

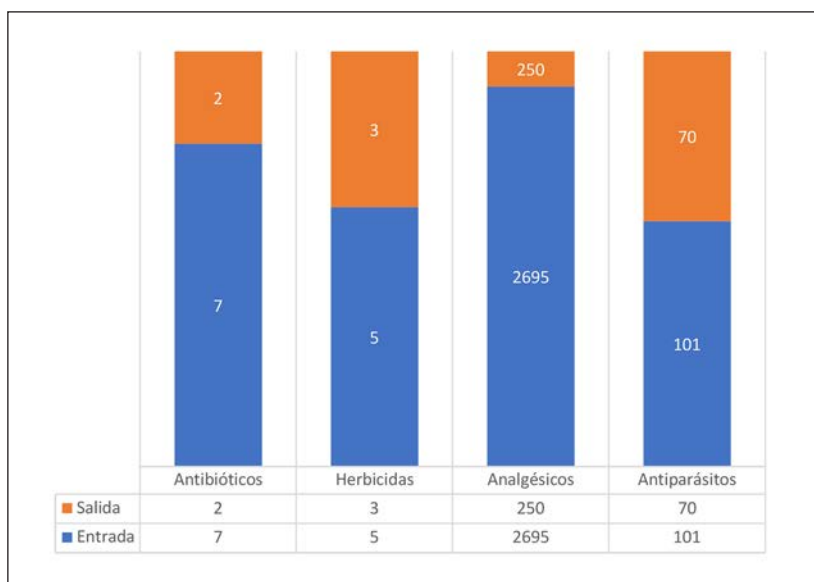
Con el fin de analizar la eficiencia de la planta de tratamiento en la eliminación de contaminantes emergentes, se obtuvieron los rendimientos de eliminación de cada uno de ellos durante todo el periodo de estudio. Los rendimientos fueron calculados según la siguiente ecuación:

$$R(\%) = \frac{C_e - C_s}{C_e} \cdot 100$$

Siendo  $C_e$  la concentración de cada uno de los contaminantes emergentes a la entrada de la planta de tratamiento y  $C_s$  la concentración a la salida de la planta de tratamiento.

## Resultados

La figura 12.3 muestra la concentración media a la entrada y a la salida de la planta de cada uno de los grupos de contaminantes analizados (herbicidas, antibióticos, analgésicos, antiparásitos) para todo el periodo de estudio. Como puede verse, las concentraciones más elevadas a la entrada de la planta se observan en los analgésicos. Sin embargo, como era de esperar, las sustancias que presentan menores concentraciones a la entrada de la planta son los herbicidas debido a que, por su actividad, la Fundación CCMIJU usa bajas concentraciones de pesticidas. Por otro lado, si se analizan los rendimientos obtenidos en la eliminación de CE (ver tabla 12.2) puede verse que se alcanzan rendimientos del 90 % en el caso de los analgésicos, seguido de los antibióticos, con un rendimiento del 71 %, herbicidas (40 % de rendimiento) y, por último, los antiparásitos que presentan un rendimiento del 31 %.



**Figura 12.3.** Concentración de CE en ng/l a la entrada y a la salida de la planta.

**Tabla 12.2.** Rendimientos de eliminación para cada uno de los grupos de sustancias analizadas

Sustancia	Rendimiento (%)
Herbicidas	40
Antibióticos	71
Analgésicos	91
Antiparásitos	31

## Conclusiones

En este trabajo se han presentado los humedales artificiales como alternativa de depuración para la eliminación de contaminantes emergentes en pequeñas poblaciones (< 2000 habitantes equivalentes) de áreas rurales. Para ello, este estudio se centró en la planta instalada en la Fundación Centro de Cirugía de Mínima Invasión Jesús Usón (CCMIJU) en Cáceres como ejemplo de pequeña población con gran aporte de efluentes agroganaderos. La tecnología se basó en la combinación de dos humedales artificiales.

Los resultados obtenidos han proporcionado altos rendimientos en la eliminación de CE, especialmente en analgésicos (91 %) y antibióticos (71 %). Por tanto, estos rendimientos observados indican que los sistemas de depuración ecológicos mediante humedales artificiales podrían ser una alternativa para la eliminación de CE en aguas residuales de pequeñas poblaciones urbanas con aporte de afluentes agroganaderos.

Igualmente, cabe destacar que este sistema depurativo ha permitido alcanzar las NCA para los contaminantes emergentes analizados (RD 60/2011), siendo estos los que mayor peso tienen en las aguas de las pequeñas poblaciones (Anderson *et al.*, 2013; Gorito, Ribeiro y Almeida, 2017).

## Bibliografía

- Agarwal, S. K. (2005). *Water pollution*. Nueva Delhi: APH Publishing Corporation.
- Anderson, J. C., Carlson, J. C., Low, J. E., Challis, J. K., Wong, C. S., Knapp, C. W. y Hanson, M. L. (2013). Performance of a constructed wetland in Grand Marais, Manitoba, Canada: removal of nutrients, pharmaceuticals, and antibiotic resistance genes from municipal wastewater. *Chem. Central J.*, 7, 54.
- Burkhardt, P. (2011). *Linking water quality to human health and environment: then fate of micropollutants*. Institute of Water Policy.
- Coquery, M., Morin, A., Becue, A. y Lepot, B. (2005). Priority substances of the European Water Framework Directive: analytical challenges in monitoring water quality. *Trends Anal. Chem.*, 24, 117-127.
- Decisión de Ejecución (UE) 2015/495 de la Comisión de 20 de marzo de 2015 por la que se establece una lista de observación de sustancias a efectos de seguimiento a nivel de la Unión en el ámbito de la política de aguas, de conformidad con la Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.
- Decisión Ejecutiva (UE) 2018/840 de la Comisión de 5 de junio de 2018 por la que se establece una lista de observación de sustancias a efectos de seguimiento a nivel de la Unión en el ámbito de la política de aguas, de conformidad con la Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, y se deroga la Decisión de Ejecución (UE) 2015/495 de la Comisión.

- Di Corcia ,A. y Nazzari, M. 2002. Liquid chromatographic-mass spectrometric methods for analyzing antibiotic and antibacterial agents in animal food products. *J Chromatogr.*, 974, 53-89.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas L 327, 22 de diciembre de 2000, pp. 1-73.
- Directiva 2008/105/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2008 relativa a las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas, por la que se modifican y derogan ulteriormente las directivas 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE y 86/280/CEE del Consejo, y por la que se modifica la Directiva 2000/60/CE, L348/84, pp. 1-14.
- Directiva 2013/39/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 12 de agosto de 2013 por la que se modifican las directivas 2000/60/CE y 2008/105/CE en cuanto a las sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas, L226/1, pp. 1-17
- Fernández-Fernández, M. I., Martín de la Vega, P. T., Jaramillo-Morán, M. A. y Garrido, M. (2020). Hybrid Constructed Wetland to improve organic matter and nutrient removal. *Water*, 12, 2023. DOI: 10.3390/w12072023.
- Gorito, A. M., Ribeiro, A. R. y Almeida, C. M. R. (2017). A review on the application of constructed wetlands for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern listed in recently launched EU legislation. *EnvironPollut.*, 227, 428-443.
- Hoffmann, E. y Stroobant, V. (1999). *Mass spectrometry. Principles and applications* (2.ª ed.). París: Jonh Wiley & Sons.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., Liang, S. y Wang, X. C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Sci. Total Environ.* DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.065.
- Raghav, M., Eden, S., Mitchell, K. y Witte, B. (2013). *Contaminants of emerging concern in Water Arroyo*. Water Resources Research Center, College of Agriculture and Life Sciences, University of Arizona, Tucson, AZ.
- Ribeiro, A. R., Nunes O. C., Pereira, M. F. y Silva, A. M. (2015). An overview of the advanced oxidation processes applied for the treatment of water pollutants defined in the recently launched Directive 2013/39/EU. *Environ. Int.*, 75, 33-51.

- Real Decreto 60/2011, de 21 de enero, sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.
- Vymazal, J. (2008). *Wastewater treatment, plant dynamics and management in constructed and natural wetlands*. Springer Science Business Media B.V.
- Vymazal, J. y Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater treatment in constructed wetland with horizontal Sb-surface flow*. Springer Science Business Media B.V.
- Xiaoyan, T., Suyu, W., Yang, Y., Ran, T., Yunv, D., Dan, A. y Li, L. (2015). Removal of sixphthalic acid esters (PAEs) from domestic sewage by constructed wetlands. *Chem. Eng. J.*, 275, 198-205.
- Zhang, D., Gersberg, R. M., Ng, W. J. y Tan S. K. (2014). Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plant-based systems: a review. *Environ. Pollut.*, 184, 620-639.



# Sobre los coordinadores

## **Silvia Román Suero**

Es ingeniera química (Universidad de Extremadura) y diplomada en Química Aplicada (Universidad de Central Lancashire, Reino Unido). Obtuvo su doctorado en la Universidad de Extremadura en el año 2009, realizada sobre el aprovechamiento de varias biomásas para su uso en la producción de carbón activado apto para adsorción de radioisótopos en centrales nucleares. A lo largo de su desarrollo investigador, centrado en el aprovechamiento termoquímico de biomasa, ha realizado varias estancias en investigación en la Universidad de Évora, la Universidad de Buenos Aires o la Universidad de Nevada, y ha podido desarrollar una amplia actividad investigadora, con más de 70 artículos científicos indexados en JCR. Actualmente es profesora titular en la UEX; desarrolla su docencia en el Departamento de Física Aplicada, en asignaturas como *Termodinámica técnica*, *Ingeniería térmica* o *Aprovechamiento de biomasa*. También ha dirigido más de 70 trabajos de fin de grado y máster y tres tesis doctorales.

Finalmente, la candidata tiene un destacado compromiso con la difusión, y ha participado en diversas acciones en diferentes niveles educativos (Educación Primaria, Secundaria, eventos abiertos...) y con diferentes grados de divulgación, como «Pint of Science», el «Día de la mujer y la niña en la ciencia», «Mujeres en tecnología», ect.

## **Diego Carmona Fernández**

Es ingeniero industrial e ingeniero técnico industrial en Electricidad por la Universidad de Extremadura (UEX) desde 1999 y 1995, respectivamente, y doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Extremadura desde 2009. Actualmente es profesor titular de universidad en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática; además, es subdirector de Ordenación Académica e Innovación de la misma. Ha participado como investigador en más de 40 proyectos y contratos con empresas. Es autor o coautor de más de 80 artículos en revistas y más de una veintena de libros y capítulos de libros. Tiene más de 50 comunicaciones en congresos internacionales y más de 40 en congresos nacionales. Realizó estancias en diferentes instituciones dedicadas a la docencia e investigación, tales como las llevadas a cabo en el INTEC en Santo Domingo (República Dominicana), en la Universidad de Panamá y en la Tecnológica de Panamá (Panamá), en la Universidade Técnica de Lisboa (Lisboa, Portugal), en la Escola Superior de Tecnologia e Gestao (Portalegre, Portugal) y en el IIT de la Universidad ICAI de Comillas, entre otras. Ha organizado y dirigido más de 80 actividades formativas diferentes, desde cursos, másteres, seminarios, talleres informativos y jornadas científicas, como el Congreso de Innovación en Educación Técnica en septiembre de 2017, o el I Ágora Internacional sobre Educación, Investigación y Empleo de 2019. Es miembro del Comité de Imparcialidad de PMM Enterprise Certification, miembro del Comité RIME y de evaluadores expertos de proyectos de investigación de ACERTA. Es revisor habitual de congresos internacionales como LACCEI (International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology) o ICCIEM (International Congress of Energy and Environment Engineering and Management), entre otros.

Finalmente, en cuanto a cargos directivos, además del ocupado actualmente, ha sido miembro de diferentes comisiones académicas de la Escuela de Ingeniería Industrial de la UEX y es miembro electo de Junta de Centro de la misma. En 2020 obtuvo el Premio de la Excelencia Docente en la Universidad de Extremadura en el campo técnico.

## Diego Rodríguez Méndez

Es ingeniero eléctrico (rama industrial) y actualmente personal científico e investigador del Departamento de Física Aplicada en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura. Perteneciente al Grupo de Investigación GAIRBER de la Universidad de Extremadura. Cuenta con experiencia en el sector de las energías renovables, eficiencia energética y tecnología, además de experiencia como *webmaster* y en gestión de equipos y *mentoring/coaching*. Además, tiene experiencia en gestión documental y coordinación de personas, siendo actualmente el secretario de la Red Iberoamericana de Mentoría (RIME), la cual tiene presencia en 15 países y más de 65 instituciones distintas (fundaciones, universidades e institutos tecnológicos, politécnicos y superiores).

Actualmente, también desarrolla la figura de coordinador del primer proceso de certificación internacional de personas que coordinan programas de mentoría.



# Índice

1. Cinética de la adsorción de contaminantes en carbones activados . . . . .	9
Introducción . . . . .	10
Metodología . . . . .	10
Resultados . . . . .	12
Conclusiones . . . . .	17
Referencias . . . . .	18
2. Influencia del estado funcional de los motores térmicos en la eficiencia energética del buque . . . . .	19
Introducción . . . . .	20
Objetivos . . . . .	24
Metodología . . . . .	25
Resultados . . . . .	27
Conclusiones . . . . .	32
Referencias . . . . .	33
3. Análisis de la actividad muscular en hipoterapia . . . . .	35
Introducción . . . . .	37
Justificación y objetivo . . . . .	37
Metodología . . . . .	38
Resultados . . . . .	40
Análisis de las paradas y arranques . . . . .	40
Análisis de ejercicios con los brazos . . . . .	41

Análisis de la activación en la respiración y el ejercicio de levantarse desde tumbado de la grupa . . . . .	41
Conclusiones . . . . .	42
Referencias . . . . .	43
4. Influencia del contenido de azufre en el combustible utilizado en el transporte marítimo sobre la calidad del aire . . . . .	45
Introducción. . . . .	46
Metodología. . . . .	49
Resultados . . . . .	52
Conclusiones . . . . .	52
Agradecimientos. . . . .	53
Referencias . . . . .	54
5. Investigación en desarrollo del potencial de aislamiento térmico de una envolvente que integra materiales tradicionales y ecológicos acompañados de sistemas inteligentes básicos para edificaciones en la ciudad de Quito. . . . .	55
Introducción. . . . .	57
Justificación . . . . .	59
Metodología. . . . .	64
Viabilidad de la investigación . . . . .	66
Resultados . . . . .	66
Conclusiones . . . . .	67
Referencias . . . . .	68
6. Degradación medioambiental y crecimiento económico: la hipótesis EKC para España y Portugal . . . . .	71
Introducción. . . . .	72
Crecimiento y medioambiente. . . . .	74
Crecimiento y energía en España y Portugal . . . . .	77
Estimación de la EKC. . . . .	82
Conclusiones . . . . .	88
Bibliografía. . . . .	89
7. Hidrocarbonización. De promesa a escala laboratorio a realidad industrial . . . . .	93
El momento actual de transición energética . . . . .	94

La tecnología. La hidrocarbonización . . . . .	96
Apuestas a escala industrial de la hidrocarbonización . . . . .	99
Conclusiones . . . . .	104
Referencias . . . . .	105
8. Realidad virtual para formación, divulgación y gestión de instalaciones de depuración de aguas residuales . . . . .	107
Introducción . . . . .	107
Materiales y métodos . . . . .	112
Discusión . . . . .	112
Conclusiones . . . . .	115
Bibliografía . . . . .	116
9. Contornos activos aplicados para la reconstrucción 3D de estructuras anatómicas . . . . .	119
Introducción . . . . .	120
Imágenes tridimensionales en el campo de la Sanidad . . . . .	121
Contornos activos para la segmentación y visualización de imágenes médicas . . . . .	122
Segmentación . . . . .	122
Segmentación de imágenes médicas basada en contornos activos . . . . .	124
Gráficos por ordenador para la reconstrucción y visualización tridimensional . . . . .	126
Visualización . . . . .	126
Perspectivas futuras . . . . .	127
Conclusiones . . . . .	128
Reconocimientos . . . . .	128
Bibliografía . . . . .	128
10. Antioxidantes naturales como aditivos sostenibles para la mejora de la estabilidad a la oxidación de biodiésel . . . . .	133
Introducción . . . . .	134
Materiales y métodos . . . . .	137
Resultados y discusión . . . . .	139
Conclusiones . . . . .	145
Agradecimientos . . . . .	147
Referencias . . . . .	147

11. Taxonomía de amenazas, vulnerabilidades y buenas prácticas para el desarrollo seguro de software . . . . .	151
Introducción. . . . .	152
Justificación . . . . .	154
Metodología. . . . .	155
Resultados . . . . .	156
Conclusiones . . . . .	158
Agradecimientos. . . . .	159
Referencias . . . . .	159
12. Caracterización de contaminantes emergentes y capacidad de remoción en aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones rurales con tecnología de humedales artificiales . . . . .	161
Introducción. . . . .	162
Normativa . . . . .	163
Origen, destino y efectos sobre el medioambiente de los contaminantes emergentes. . . . .	165
Tratamientos de eliminación de contaminantes emergentes. Humedales artificiales . . . . .	166
Mapa depurativo en Extremadura. Un caso de estudio: planta de tratamiento instalada en la Fundación CCMIJU . . . . .	169
Descripción de las instalaciones. . . . .	170
Toma de muestras y cálculos de rendimientos de eliminación de contaminantes. . . . .	171
Resultados . . . . .	172
Conclusiones . . . . .	173
Bibliografía. . . . .	174
Sobre los coordinadores . . . . .	177





## Experiencias de investigación para un futuro sostenible

En este momento asistimos a un cambio obligado en el paradigma energético y de gestión de recursos en el planeta para poder acometer los cambios en los modelos productivos y de consumo que nos permitan garantizar el desarrollo sostenible. Son grandes retos: lucha contra el cambio climático; disminución de la contaminación en agua, aire y suelo; erradicación de la pobreza; protección de la biodiversidad; conseguir una energía limpia y asequible, ciudades y comunidades sostenibles... Retos que, además, están interconectados y han de ser abordados desde una visión amplia e inclusiva.

El esfuerzo realizado a través de la innovación en I+D es esencial para mejorar la eficiencia de procesos y hacer un uso más optimizado de los recursos, así como para profundizar en el conocimiento que permita un mejor control de los procesos. En ese marco surge la motivación de un grupo de investigadores de diversas procedencias por participar en esta obra. *Experiencias de investigación para un futuro sostenible* aborda aspectos como la eficiencia energética en la construcción o el transporte, la biorrefinería y extracción sostenible de recursos, el empleo de redes multidisciplinares de trabajo para el control y mitigación de emisiones, los procesos de descontaminación de aguas, las aplicaciones de las TIC y la inteligencia artificial para la mejor gestión de los procesos. Y se abordan también mejores prácticas en el sector de la salud.

Conscientes de que los grandes cambios tienen su origen en las pequeñas acciones y en la necesaria cohesión de los diferentes campos de conocimiento para viajar lejos, mejor que rápido, mostramos aquí la semilla de lo que serán avances hacia ese modelo integrador y respetuoso.

**Silvia Román Suero.** Doctora e ingeniera química (Universidad de Extremadura) y diplomada en Química Aplicada (Universidad de Central Lancashire, Reino Unido). Su desarrollo investigador se ha centrado en el aprovechamiento termoquímico de biomasa. Actualmente es profesora titular en la UEX, Departamento de Física Aplicada.

**Diego Carmona Fernández.** Ingeniero industrial y técnico-industrial en Electricidad por la Universidad de Extremadura (UEX), doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Extremadura en 2009. Actualmente es profesor titular en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, y subdirector de Ordenación Académica e Innovación de la misma.

**Diego Rodríguez Méndez.** Ingeniero eléctrico (rama industrial) y actualmente científico e investigador del Departamento de Física Aplicada en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura. Perteneciente al grupo de investigación GAIRBER de la Universidad de Extremadura. Coordina el primer proceso de certificación internacional de personas que participan en programas de mentoría.

