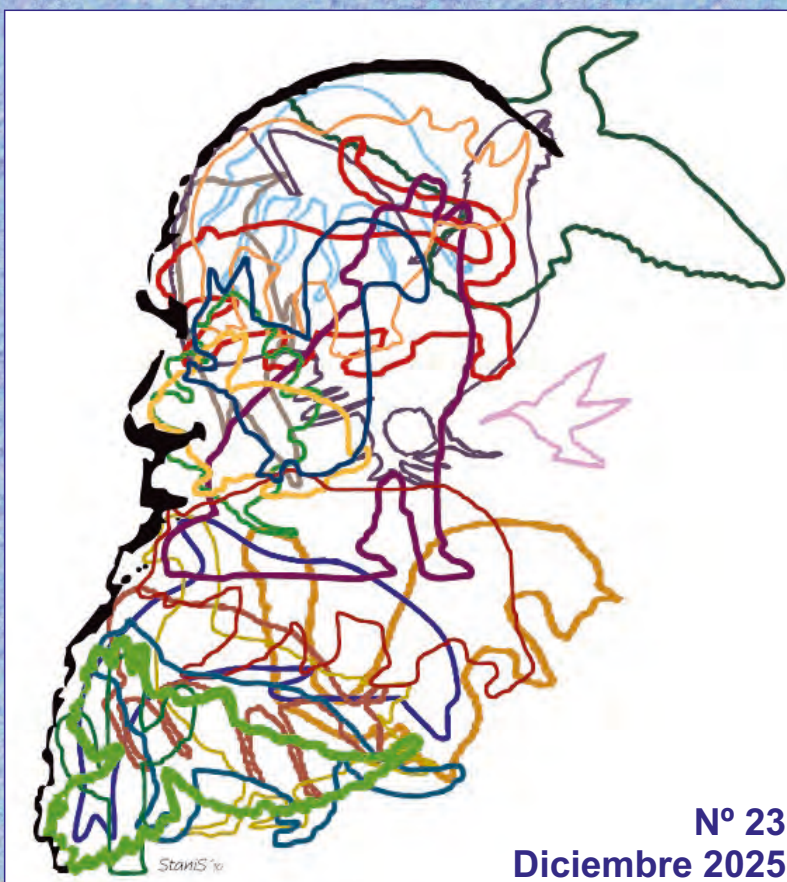


Ambio ciencias



REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA E INNOVACIÓN DOCENTE



Nº 23
Diciembre 2025

★ 1968 ★



★ 2025 ★

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES. UNIVERSIDAD DE LEÓN

Consejo de Redacción

Directora:

Sara del Río González Catedrática de Universidad del Área de Botánica

Secretaria:

Ana Isabel González Cordero Vice-Decana de la Facultad de CC. Biológicas y Ambientales

Miembros:

Estanislao de Luis Calabuig	Catedrático de Universidad del Área de Ecología
José Luis Acebes Arranz	Catedrático de Universidad del Área de Fisiología Vegetal
María Paz Herráez Ortega	Catedrática de Universidad del Área de Biología Celular
Luis Mariano Mateos Delgado	Catedrático de Universidad del Área de Microbiología
Luis E. Sáenz de Miera Carnicer	Catedrático de Universidad del Área de Genética
Daniela Canestrari	Profesora Titular de Universidad del Área de Zoología
Gracia Merino Pélaez	Profesora Titular de Universidad del Área de Fisiología
Laura Rodríguez García	Profesora Titular de Universidad del Área de Antropología Física
Andrés Merino Suances	Profesor Titular de Universidad del Área de Física Aplicada
Giovanni Breogán Ferreiro Lera	Alumno de Doctorado

Edita: Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales de la Universidad de León

Colabora: Servicio de Publicaciones de la Universidad de León.

Maquetación: David Aller Llamera

© **Universidad de León**

© **Los autores**

ISSN: 1988-3021 (edición digital)

Dep. Legal: LE-903-07



**universidad
de león**



Facultad de Ciencias
Biológicas y Ambientales

EN PORTADA:

Logotipo diseñado por el Dr. Estanislao de Luis Calabuig inspirado en la figura de Sir Charles Darwin.

ÍNDICE**EDITORIAL**

Los incendios forestales de 2025 y el nacimiento de ULEgif (Grupo de Gestión Integral de Incendios Forestales de la Universidad de León)

Laura López Campano.....5

A FONDO

ARNm y nanotecnología: el futuro de las vacunas y la medicina de precisión

Ana M. López-Estévez y María J. Alonso.....7

PONIENDO EN CLARO

Proantocianidinas: escudo molecular frente a la hipertrofia cardiaca

Diana Alcubilla Solano, Ileana Bonilauri y Beatriz Martín Fernández 19

Presencia, problemática y eliminación de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas en el agua: adsorción mediante carbón activado

Celia Pol Bodelón y Marta Otero Cabero 31

SIGUIENDO LA PISTA

Cartografía digital de las propiedades edáficas superficiales en el área de Riello, noroeste de León

Carmen Vega Valdés, Montserrat Ferrer Julià y Sara Alcalde Aparicio 43

Estudio del impacto de un choque térmico agudo durante la gastrulación a través de una línea transgénica de pez cebra (*Danio rerio*)

Mario Barrio Robles, David G. Valcarce y Vanesa Robles.....57

BAÚL DE LA CIENCIA

La importancia del tamaño en Biología: implicaciones del cambio de tamaño en el linaje humano

Laura Rodríguez García.....73

¿Por qué las paredes celulares de plantas son importantes en la resistencia frente a patógenos?

Asier Largo Gosens..... 89

UNO DE LOS NUESTROS

Santiagué o la forja de un Nobel: infancia y juventud de Cajal

José Manuel Ramón y Cajal y Estanislao de Luis Calabuig 101

Fulgor y muerte de Nicolai Vavilov (1889-1943)

Pablo Huerga Melcón111

AMBIÓLOGOS DE AQUÍ

Un ambientólogo en AEMET

Sergio Fernández González129

MI PROYECTO DE TESIS

Efecto de los incendios forestales extremos sobre la provisión de servicios ecosistémicos. Importancia de la restauración post-fuego

Sara Turiel-Santos, Ángela Taboada Palomares y M^a Leonor Calvo Galván 135

EDUCANDO EN LO NUESTRO

La experiencia del estudiantado de Ciencias Biológicas y Ambientales en la dinamización rural de la provincia de León. Programa RALBAR

Ana Vázquez Casares y Raquel Domínguez Fernández.....139

DE TODO UN POCO159

EDITORIAL

Los incendios forestales de 2025 y el nacimiento de ULEgif (Grupo de Gestión Integral de Incendios Forestales de la Universidad de León)

España vive una intensificación de los riesgos naturales —sequías, incendios forestales, inundaciones y temporales— como consecuencia directa del Cambio Climático. Este fenómeno ha hecho que el país se caliente un 30 % más rápido que la media mundial. El proyecto CLIVAR-Spain muestra el preocupante estado del clima y sus posibles repercusiones futuras. Afirma que todas las aguas oceánicas que rodean la Península Ibérica y sus archipiélagos están experimentando un calentamiento un 67 % más rápido que el promedio global. Además, es previsible que España se enfrente a un fuerte calentamiento, especialmente en verano con temperaturas que aumentarán 1,6 veces más rápido que la media mundial. Otra preocupante tendencia es una disminución de la precipitación media a lo largo del siglo. Al mismo tiempo, las precipitaciones extremas aumentarán. Ejemplos recientes de estos riesgos naturales son la ola de calor de 2003, que causó casi 13.000 muertes en España o las inundaciones de 2024 en Valencia (con 237 víctimas y pérdidas superiores a 17.800 millones de euros) causadas por una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA).

En Castilla y León, los efectos del Cambio Climático se manifiestan ya con sequías prolongadas, aumento de temperaturas, inviernos menos fríos y una frecuencia creciente de incendios devastadores.

Desafortunadamente, este año 2025 será recordado desde el punto de vista medioambiental por los gravísimos incendios forestales sufridos en España. Este pasado verano se quemaron más de 354.000 hectáreas, el peor dato desde que existen registros. Castilla y León fue una de las comunidades más afectadas, con graves daños ambientales, sociales y económicos. El incendio de Molezuelas de la Carballeda (Zamora y León), se ha convertido en el más extenso de la historia de España, calcinando más de 37.000 hectáreas. Solo en Castilla y León se han quemado 150.000 hectáreas.

Para explicar estos datos, podemos destacar tres factores que agravan la virulencia de los incendios: la falta de gestión forestal, el abandono rural y el Cambio Climático.

Es conocido que los montes que no tienen una gestión activa (desbroces, cortafuegos) están mucho más expuestos. En contraste, los montes bien gestionados, resisten y ralentizan la expansión del fuego. Además, el abandono rural y la despoblación hace que donde antes había pastoreo y aprovechamiento tradicional, hoy predomine el desuso, hecho que puede favorecer la existencia de incendios. Y finalmente, el Cambio Climático agrava la situación: olas de calor cada vez más frecuentes y veranos extremadamente secos que pueden asociarse con

incendios cada vez más frecuentes y severos. Las altas temperaturas y la sequía prolongada dejan los montes en situación de riesgo crítico ante incendios provocados por rayos o bien causados por el hombre.

Es necesario señalar que, en España, el 95 % aproximadamente de los incendios forestales son causados por el hombre, siendo entre un 19 y un 25 % el porcentaje de intencionados. El porcentaje restante se corresponde con negligencias o accidentes.

Ante la gravísima situación sufrida este año 2025, un ejemplo de respuesta activa ha sido la creación de ULEgif (Grupo de Gestión Integral de Incendios Forestales) por parte de la Universidad de León. Esta iniciativa agrupa a 20 grupos de investigación y más de un centenar de expertos de distintas disciplinas (Ecología, Física de la Atmósfera, Botánica, Zoología, Educación Ambiental, Ingeniería Forestal, Salud, Psicología o Economía, entre otros). Su objetivo es ofrecer soluciones integrales y científicamente fundamentadas para prevenir, mitigar y restaurar los efectos de los incendios. Además, busca asesorar a las instituciones y acompañar a las comunidades afectadas, promoviendo una gestión sostenible del paisaje y una bioeconomía rural sólida.

Los investigadores implicados, muchos pertenecientes a la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales y comprometidos con la revista AmbioCien, coinciden en que los incendios no son solo una causa, sino un síntoma de problemas estructurales como los citados. Por ello, defienden pasar de la “reacción” a la “acción preventiva”, integrando el conocimiento científico en la toma de decisiones políticas y en la formación de nuevas generaciones de profesionales ambientales.

En resumen, los grandes incendios forestales en España no son sólo un fenómeno natural, sino la consecuencia de factores sociales, económicos y climáticos. Apostar por la gestión forestal responsable, la educación ambiental y el desarrollo local es el mejor “cortafuegos” frente a un futuro cada vez más incierto. El Grupo ULEgif, que ofrece soluciones integrales y multidisciplinarias a las causas y consecuencias de las emergencias ambientales, nos muestra el camino hacia una nueva relación entre la Universidad, el territorio y la sostenibilidad medioambiental.

Laura López Campano

Decana de la Facultad de CC. Biológicas y Ambientales

A FONDO

ARNm y nanotecnología: el futuro de las vacunas y la medicina de precisión

Ana M. López-Estévez¹, María J. Alonso^{2,3}

¹ Laboratorio de Nanotecnología para Medicina de Precisión, Instituto Italiano de Tecnología, Via Morego, 30, Génova, 16163 Italia

² Departamento de Farmacia y Tecnología Farmacéutica, Facultad de Farmacia, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 15782 España

³ Centro de Investigación en Medicina Molecular y Enfermedades Crónicas (Ci-MUS), Instituto de Investigación Sanitaria de Santiago de Compostela, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 15782 España

Resumen

La pandemia de COVID-19 supuso la mayor emergencia sanitaria de la historia reciente. Ante esta situación, la prevención se convirtió en la única estrategia plausible para frenar su propagación, lo que provocó una carrera por el desarrollo de vacunas seguras y eficaces. Fueron las vacunas de ARNm de Pfizer-BioNTech y Moderna las primeras en recibir autorización para su comercialización. Este hito, conseguido en un tiempo récord, fue posible gracias a décadas de investigación en tecnologías ómicas, inteligencia artificial y nanotecnología. Particularmente la nanotecnología farmacéutica se convirtió en una herramienta fundamental para que el ARNm pudiera cumplir su función. El éxito logrado abrió una nueva etapa en el desarrollo de vacunas y terapias avanzadas indicadas en el tratamiento del cáncer y otras enfermedades. De hecho, la convergencia de la nanotecnología y la biología molecular está sentando las bases para tratamientos más precisos y eficaces, con el potencial de revolucionar la medicina en los próximos años. En este artículo repasamos la historia de las vacunas y su evolución paralela con la nanotecnología, así como el papel clave del ARNm y las nanopartículas en la pandemia. También abordamos los desafíos aún por resolver y ofrecemos una mirada hacia el futuro, explorando los próximos hitos en los que el ARNm y la nanotecnología serán protagonistas.

Palabras clave:

ARNm, COVID-19, nanotecnología, terapias avanzadas, vacunas.

Vacunas y terapias basadas en ARNm: perspectiva histórica

La pandemia de COVID-19, causada por el coronavirus SARS-CoV-2, puso en jaque a los sistemas sanitarios y a la sociedad a nivel mundial. El número

de casos y muertes aumentaba de forma alarmante y la vacunación se convirtió en la principal estrategia para frenar la propagación del virus. El 11 de marzo de 2020, la Organización Mundial de la Salud (OMS) declaró oficialmente la pandemia, lo que impulsó una carrera científica y tecnológica sin precedentes para desarrollar una vacuna segura y eficaz en un tiempo récord.

En menos de 1 año, se autorizaron las vacunas de ácido ribonucleico mensajero (ARNm) contra la COVID-19, marcando una nueva era para las vacunas. Por primera vez, la sociedad pudo seguir en tiempo real el proceso de investigación, desarrollo y distribución de estas vacunas, presenciando cómo años de investigación básica se traducían en una herramienta crucial para controlar una crisis sanitaria global. Aunque para la sociedad las vacunas contra la COVID-19 supusieron un hito sin precedentes, la realidad es que el desarrollo de éstas es el fruto de décadas de investigación nutrida por la inmunología, virología, genética molecular y tecnología farmacéutica, así como las tecnologías ómicas y la inteligencia artificial. Ya en 1796, Edward Jenner demostró que, tras administrar parte del material contenido en las pústulas de viruela bovina, no se producía contagio tras la exposición al virus. Así, se desarrolló la primera vacuna eficaz contra la viruela, que además permitió acuñar el término “vacuna”, del latín *vacca*, vaca. Tras este éxito, muchos otros científicos entendieron que el concepto de vacuna era aplicable a otras muchas enfermedades. Es el caso de Louis Pasteur en 1885, con la vacuna contra la rabia o el aislamiento de una cepa de la difteria por Anna Wessels Williams en 1894, hallazgo crucial para el desarrollo de una antitoxina contra la enfermedad. Estos descubrimientos marcaron el inicio de una era en la que distintos científicos contribuyeron al desarrollo de nuevas vacunas contra enfermedades graves. Como ya es sabido, el desarrollo de una vacuna es solo la mitad de la batalla; la otra mitad es una vacunación masiva de la población, iniciativa que fue puesta en marcha por primera vez por la OMS en 1967 con el fin de erradicar la viruela (World Health Organization (OMS), 2025).

La década de los 60 supuso una etapa de plenitud para la ciencia. En esa década, no solo se desarrollaban vacunas y se seguían estrategias de vacunación mundial, sino que empezaban a germinar conceptos clave para las vacunas contra la COVID-19, como el de “sistemas de liberación controlada”. Este concepto introducido por los clínicos Judah Folkman y Alejandro Zaffaroni presentaba la idea de modular el paso de fármacos a través del organismo a fin de mejorar la respuesta terapéutica y reducir los efectos adversos. Fruto de esa línea de pensamiento fue la creación de la empresa Alza Corporation en 1968, la primera empresa orientada al diseño de sistemas de liberación controlada de fármacos (Hillery y Park, 2017). Esta idea que en un principio parecía inalcanzable fue la semilla para el diseño de los miles de productos de liberación controlada de fármacos que encontramos en el mercado. Posiblemente, algunos de los sistemas inyectables de liberación de fármacos más conocidos son aquellos empleados en el tratamiento de la esquizofrenia (Risperdal®, Invega®) y del cáncer de próstata (Luprondepot®), entre otros.

En paralelo, surgió la idea de modificar la biodistribución de fármacos mediante la nanotecnología. La visión de transportar fármacos a través de nuestro organismo para dirigirlos a su diana terapéutica se atribuye a Alec D. Bangham, quien, tratando de diseñar células sanguíneas artificiales, produjo unas vesículas constituidas por un interior acuoso y una doble capa fosfolipídica, similar a la membrana celular, a las que denominó liposomas (Bangham, 1995). Bangham observó que dichas vesículas podían transportar fármacos hacia su lugar de acción. Este concepto de orientación selectiva de fármacos (*drug targeting*) había sido anteriormente preconizado por el premio Nobel Paul Ehrlich, a través de la idea de la “bala mágica”.

Con el tiempo, el conocimiento generado sobre el uso de la nanotecnología para mejorar la eficacia de las terapias fue aplicado al ARN. Como los premios Nobel Karikó y Weissman han afirmado, sin las nanopartículas no hubieran existido las vacunas, ni existirían las numerosas terapias que actualmente se encuentran en desarrollo.

Función del ARNm en el desarrollo de una respuesta inmune

A diferencia de las vacunas convencionales, consistentes en virus atenuados o componentes víricos o bacterianos, las vacunas de ARNm contienen la información para que nuestro organismo sintetice el antígeno proteico sin necesidad de usar el virus real. Así, las células leen el mensaje que contiene el ARNm y fabrican una señal (antígeno/proteína). En el caso de las vacunas contra la COVID-19, este ARNm lleva las instrucciones para que las células produzcan una proteína que simula un componente del virus, conocida como la proteína Spike o proteína de la espícula. Esta proteína se encarga de alertar al sistema inmune produciendo anticuerpos capaces de neutralizar cualquier virus que entre en el organismo.

Esta teórica capacidad del ARNm de producir proteínas se ve, sin embargo, limitada por su gran inestabilidad y dificultad para atravesar las membranas celulares, y transportar la información que lleva asociada (**Fig. 1**). Aquí es donde juega un papel esencial la nanotecnología.

La conjunción del ARNm y la nanotecnología

Un descubrimiento fundamental en el ámbito de las vacunas logrado por los premios Nobel Katalin Karikó y Drew Weissman fue el de modificar las cadenas de ARN para evitar una respuesta inmune descontrolada (Karikó *et al.*, 2005; Anderson *et al.*, 2010). Por otro lado, investigadores de renombre como Peter Cullis y Robert Langer, entre otros, lograron diseñar nanopartículas capaces de proteger al ARN frente a su degradación en el organismo, así como facilitar su entrada a las células transportando la información para que se produzcan las proteínas o antígenos (Langer y Folkman, 1976; Cullis y Hope, 2017; Hou *et al.*, 2021). La nanotecnología, a través de la formulación de nanopartículas, ha abierto un gran abanico de estrategias terapéuticas, entre ellas la medicina personalizada. Ello se

debe a su capacidad para facilitar el acceso de los fármacos, y de forma particular el ARN, a órganos y células específicas en las que reside la diana terapéutica.

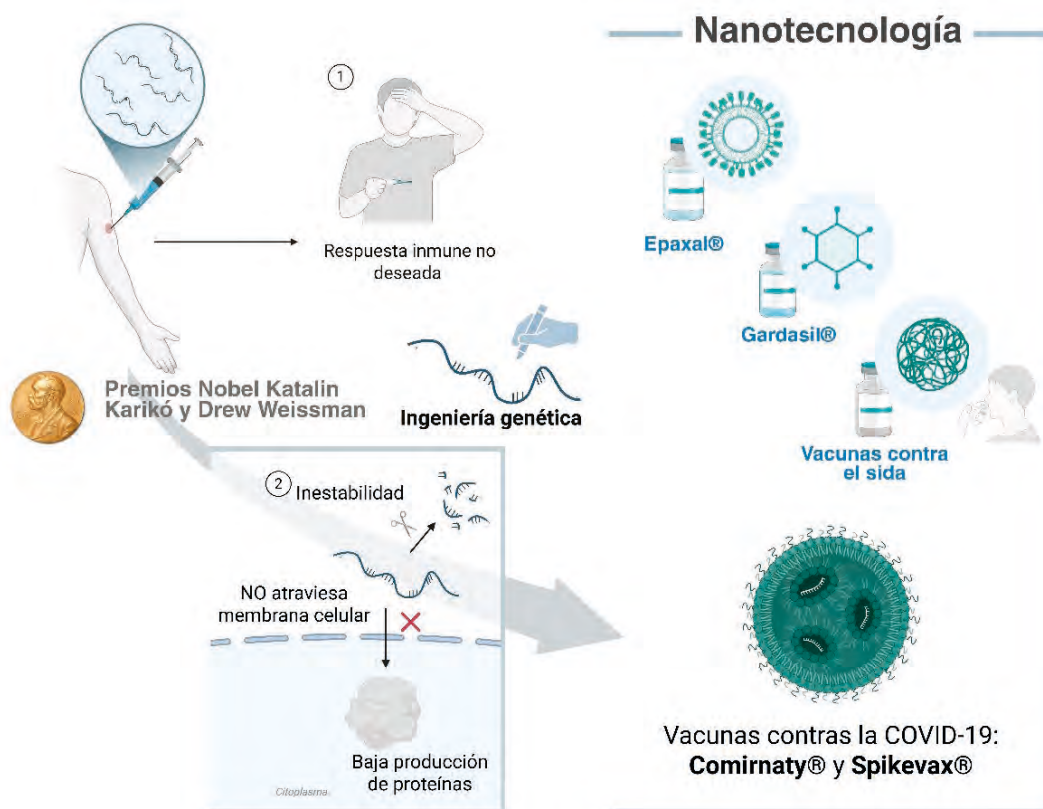


Figura 1. Simbiosis entre el ARNm y la nanotecnología. El ARNm tiene un gran potencial, pero a lo largo de su viaje en el cuerpo humano se enfrenta a: (1) el cuerpo humano reconoce al ARNm como un agente externo, lo que genera una respuesta inmune no deseada al ser administrado. Este problema fue resuelto por los premios Nobel Karikó y Weissman gracias a la modificación del ARNm y (2) la inestabilidad del ARNm en el cuerpo humano e incapacidad para atravesar la membrana celular, lo que impide la producción de proteínas. El desarrollo paralelo de la nanotecnología ha permitido resolver estos problemas mediante vacunas basadas en liposomas, partículas similares a virus u otras nanopartículas, usadas en enfermedades como el sida. Todo ello ha culminado en las vacunas contra la COVID-19.

Aunque la pandemia de la COVID-19 ha puesto en “punta de lanza” a la nanotecnología, lo cierto es que ya en 1978 varios científicos propusieron el uso de unas vesículas nanométricas denominadas liposomas para transportar ARNm (Dimitriadis, 1978; Ostro *et al.*, 1978) tratando de simular el comportamiento de un virus.

En esta línea, cabe mencionar las nanovacunas como Epaxal®, una vacuna comercializada para la prevención de la hepatitis que está basada en el con-

cepto de los virosomas, que son estructuras liposomales que contienen glicoproteínas virales convenientemente insertadas en su superficie. Otro claro ejemplo es Gardasil®, una vacuna de partículas similares a virus contra el virus del papiloma humano. Por otro lado, son numerosas las vacunas basadas en la formación de nanoemulsiones que combinan antígenos con agentes inmunoestimulantes, comercializadas para combatir la gripe estacional, y son también varios los desarrollos clínicos de vacunas en forma tanto de liposomas como de nanoemulsiones que sugieren una pronta comercialización (Bernasconi *et al.*, 2016; Filipić *et al.*, 2023). En definitiva, el campo de las vacunas está ampliamente abierto a la innovación en términos no únicamente de generar nuevos antígenos sino sistemas adyuvantes modernos, seguros y eficaces, aspecto en el que la nanotecnología puede dar lugar a importantes aportaciones. De hecho, fue el profesor Langer del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) quien en la década de los 70 propuso la idea de liberar antígenos, de forma controlada, a partir de un soporte polimérico, con el objetivo de prolongar su respuesta y evitar el calendario de vacunación múltiple requerido para la mayoría de las vacunas. Tras décadas de esfuerzo en el ámbito del ARN y de las nanopartículas, se pudieron diseñar nanopartículas lipídicas, adaptadas específicamente para transportar el ARNm, como son las presentes en las vacunas aprobadas contra la COVID-19: Comirnaty® y Spikevax®.

Nuestro grupo de investigación ha trabajado durante décadas en el uso de la nanotecnología para el desarrollo de vacunas. En los años 90 nuestro trabajo se centró en el desarrollo de vacunas que no necesitan ser inyectadas ya que se pueden administrar por vía nasal. Este desarrollo fue potenciado por el programa de salud global financiado por la Fundación Bill & Melinda Gates. En esta línea se enmarca nuestro desarrollo de una potencial vacuna frente al sida, administrada por vía nasal, en colaboración con investigadores estadounidenses y canadienses.

Adyuvantes clásicos y nanopartículas como vehículos de vacunas

Las vacunas convencionales están compuestas por un antígeno y un adyuvante. Los antígenos pueden ser proteínas de origen vírico o bacteriano. Los adyuvantes se usan para potenciar la respuesta inmunitaria, siendo los más usados en la clínica las sales de aluminio. Ejemplos de vacunas que contienen sales de aluminio son las vacunas contra la difteria, el tétanos, la meningitis y la hepatitis B, entre otras (Shi *et al.*, 2019).

Las vacunas ARN han representado una innovación disruptiva que, si bien no requieren de un adyuvante clásico, no funcionan a menos que sean transportadas por un vehículo de tamaño nanométrico. Las nanopartículas lipídicas han sido precisamente diseñadas para proteger el ARNm y transportarlo hasta el interior de las células. Su eficacia viene determinada por su composición, típicamente formada por lípidos ionizables, fosfolípidos, colesterol y un lípido PEGilado (**Fig. 2**).

En 2018 se comercializó la primera nanopartícula lipídica compuesta por estos lípidos para la administración de ARN, Onpattro®, indicada para el tratamiento de la polineuropatía por amiloidosis hereditaria. Esta experiencia demostró la eficacia y seguridad de las nanopartículas lipídicas, que dos años después inspiraron la tecnología utilizada en las vacunas de COVID-19. Siguiendo esta estela, en 2024, se comercializó otra vacuna-ARNm (mResvia™), en este caso, para prevenir la enfermedad de las vías respiratorias inferiores.

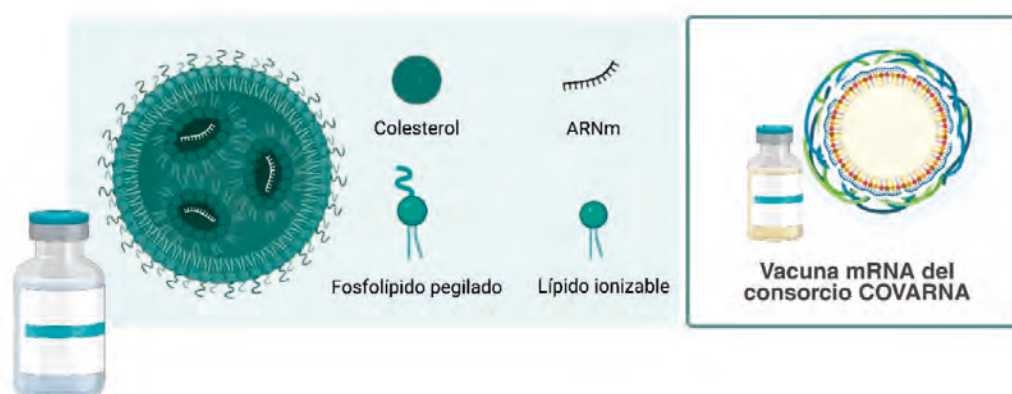


Figura 2. Estructuras y composición de las nanopartículas lipídicas para la entrega de ARNm. La mezcla lipídica incluye un lípido ionizable que interactúa con el ARNm durante la formulación, protegiéndolo en el interior de la nanopartícula. En el desarrollo de vacunas en el ámbito nacional destaca el consorcio COVARNA, integrado por investigadores españoles, que trabajaron en una vacuna nasal alternativa a las comercializadas.

Vacunas contra la COVID-19

En diciembre de 2020, solo 11 meses después de la notificación de los primeros casos de COVID-19, se aprobaron las vacunas ARNm de Pfizer–BioNTech (Comirnaty®) y Moderna (Spikevax®). El reto para estas empresas no fue solo luchar contra el rápido avance de la COVID-19, sino asegurar que el ARNm era un producto seguro y eficaz que permitía estimular el sistema inmunológico de forma controlada. Para ello, usaron ARNm modificado químicamente, sustituyendo la uridina por metil-pseudouridina (Kon *et al.*, 2022). Otras muchas empresas con experiencia en ARNm han seguido la estela de Pfizer–BioNTech y Moderna.

Aunque las vacunas comercializadas no se desarrollaron en España, grupos del país – incluido nuestro laboratorio en la Universidad de Santiago de Compostela – trabajamos en el desarrollo de una vacuna alternativa a las comerciales. Para ello constituimos el consorcio COVARNA, formado por varios grupos españoles y un equipo belga (Marcos-Villar *et al.*, 2024). Los resultados iniciales obtenidos con estas formulaciones han sido muy prometedores y nos han llevado a la colaboración con un consorcio europeo en el desarrollo de vacunas nasales basadas en ARN.

El tiempo habitual para el desarrollo de nuevas vacunas es de varios años, sin embargo, en el caso de las vacunas COVID-19 este proceso se completó en solo 11 meses. De hecho, desde la publicación del primer genoma viral, la secuencia de la vacuna se obtuvo en solo dos días, la primera dosis se fabricó en 25 días, y se administró a un paciente en el ensayo clínico de fase 1 en tan solo 63 días (Kon *et al.*, 2022). Esta drástica reducción de tiempo fue consecuencia del desarrollo previo de las tecnologías facilitadoras, el extraordinario esfuerzo realizado por los científicos y las farmacéuticas, así como por la altísima financiación motivada por la catástrofe mundial. Además, se recurrió a estrategias que permitieron acortar la duración de los ensayos clínicos y su evaluación por parte de las agencias evaluadoras de los medicamentos. Esta situación ha dado herramientas a las agencias reguladoras para actuar en situaciones de emergencia a la vez que estandarizar procesos y armonizar datos o procesos con otras agencias. Además, se dedicaron notables esfuerzos para acelerar la producción masiva de vacunas preservadas a bajas temperaturas (entre -20 y -80 °C), lo que supuso un reto aún mayor para países en desarrollo.

ARNm más allá de las vacunas contra la COVID-19

Las terapias ARNm representan un cambio paradigmático en el modo de tratar las enfermedades. Si bien, la mayoría de los medicamentos comercializados actúan aliviando y corrigiendo los síntomas de las enfermedades, las terapias ARN actúan a nivel del origen de la enfermedad, siendo la causa principal la alteración en las proteínas, bien por su deficiencia, exceso o mal funcionamiento. De este modo, el ARN actúa produciendo la proteína deficiente,

silenciando la proteína que se produce en exceso o corrigiendo las proteínas aberrantes como es el caso de las oncoproteínas. Además, en el caso del cáncer pueden actuar potenciando el sistema inmune (**Fig. 3**) (Qin *et al.*, 2022).

Vacunas de ARNm contra el cáncer. Las vacunas contra el cáncer usan el sistema inmune del organismo y lo hacen más eficaz. En general, el objetivo es estimular la actividad de células T citotóxicas para que puedan atacar el tumor y eliminarlo. Aunque no hay ninguna vacuna de ARNm con nanopartículas aprobada contra el cáncer, recientemente ha entrado en fases clínicas avanzadas una vacuna para pacientes con melanoma y cáncer de pulmón (Merck, 2024). De esta forma, el sistema inmune, que hasta el momento ayudaba al tumor a seguir creciendo, invierte su función participando en la eliminación del tumor. La misma estrategia hoy en día se estudia para tumores sólidos avanzados o recurrentes (Everest Medicines, 2025).

ARNm para la sustitución de proteínas en enfermedades. Algunas enfermedades genéticas, cardiovasculares y autoinmunes, entre otras, se deben a que el organismo no puede producir ciertas proteínas funcionales, ya sea por ausencia total o por deficiencia. Esto provoca graves alteraciones metabólicas o funcionales. En estos casos, el uso de ARNm encapsulado en nanopartículas permite que las células fabriquen la proteína que falta, restaurando su función

normal. Este enfoque resulta especialmente prometedor para enfermedades raras, ya que facilita el desarrollo de tratamientos personalizados adaptados a cada paciente. Actualmente, patologías como la fibrosis quística (Rowe *et al.*, 2023) y enfermedades metabólicas se encuentran en fase de evaluación clínica con esta tecnología. Por su parte, Moderna ha iniciado dos ensayos clínicos para evaluar la seguridad de este tipo de terapia en enfermedades metabólicas hereditarias graves: acidemia propiónica (NCT04159103) y acidemia metilmalónica aislada (NCT04899310). El objetivo es que las células produzcan las enzimas que el organismo no puede generar por sí mismo. Ambos estudios están en curso, por lo que sus resultados se darán a conocer en los próximos años.

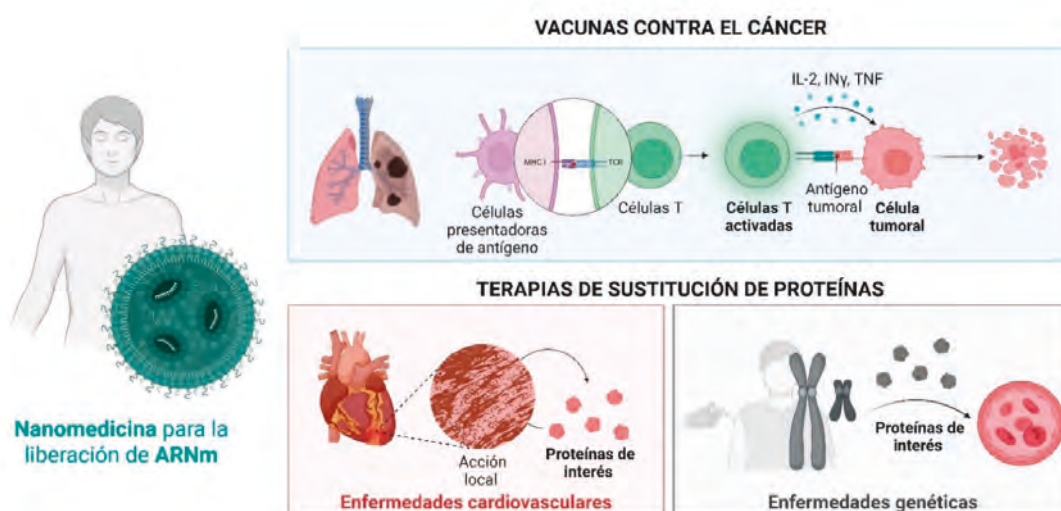


Figura 3. Más allá de la COVID-19. El ARNm hace uso de la nanotecnología en inmunoterapia -vacunas contra el cáncer- y terapias de sustitución de proteínas destacando las enfermedades cardiovasculares y genéticas.

Desafíos y retos por resolver

A pesar de los avances logrados con la aprobación de las vacunas, todavía hay margen de mejora del que no solo se pueden beneficiar las futuras generaciones de vacunas sino la nanomedicina en su conjunto.

Maximizar la respuesta inmunitaria y reducir la reactogenicidad. La modificación química de la secuencia de nucleótidos o la optimización de las formulaciones de nanopartículas son métodos que ya se están explorando.

Optimizar la seguridad, el cumplimiento y la producción. Factores que pueden parecer poco relevantes, como la edad, el estado de salud del paciente o la administración en pacientes polimedicados, son claves para garantizar la seguridad de las vacunas. Además, la posibilidad de administrar las vacunas por vía nasal se presenta como una posibilidad para facilitar el cumplimiento, así como

la vacunación en los países que no dispongan de infraestructura sanitaria. Respecto a la producción de vacunas, la producción local es fundamental, no solo por la reducción de costos de traslados y mejora de la seguridad, sino que dota al país de la capacidad de investigar y producir tratamientos para enfermedades que son específicas de su región y que de otro modo podrían quedar desatendidas.

Almacenamiento y estabilidad de las vacunas. Un desafío claro supone la vacunación de la población independientemente de su contexto geográfico y/o socioeconómico. Uno de los factores que limita dicha expansión es la estabilidad de las vacunas. Las vacunas contra la COVID-19 se congelan para su almacenamiento a largo plazo y tras su descongelación se almacenan por un periodo limitado a 2–8 °C. Sin embargo, es necesario que sean estables a 4 °C y a temperatura ambiente durante periodos más largos, garantizando así el acceso a nivel mundial. Para lograr dicha termoestabilidad, se están estudiando varias estrategias, como modificar los componentes de las vacunas o la estructura del ARNm, adicionar azúcares al medio de formulación o la consideración de otras formas farmacéuticas, en lugar de administrar su forma líquida, como es el caso de las vacunas liofilizadas, rehidratadas antes de la administración.

Impacto de los avances en ARNm y mirada al futuro.

A lo largo de las últimas décadas, los nanomedicamentos han ido demostrando de forma creciente su impacto en la prevención y tratamiento de enfermedades, alcanzando su punto más álgido con el desarrollo de las vacunas frente a la COVID-19. La demostrada capacidad de estas tecnologías para mejorar el balance eficacia/toxicidad de medicamentos conocidos, así como para hacer factibles nuevas terapias y vacunas, como es el caso de las vacunas ARNm, ha suscitado una gran atención por parte del mundo académico y también de la industria. Esta atención creciente se ha traducido en un incremento exponencial en el número de artículos científicos y de patentes. El análisis de esta evolución nos lleva a prever un futuro muy prometedor para la nanomedicina en su relación con las vacunas, las terapias de precisión y las terapias avanzadas (**Fig. 4**). En esta línea destaca la terapia de células T con receptores quiméricos de antígenos (CAR-T) cuyo objetivo es la modificación de los linfocitos T para que destruyan células cancerosas. Aunque esto inicialmente se ha logrado mediante el uso de vectores virales, estudios recientes sugieren que la liberación de ARNm mediante nanopartículas es una alternativa realista (Wu *et al.*, 2024; Bot *et al.*, 2025).

No podemos olvidar el papel del ARNm para corregir enfermedades hereditarias. Este es el caso de la herramienta de edición de genes CRISPR-Cas9 (Wu *et al.*, 2025). Se trata de un método inspirado en la inmunidad bacteriana que permite editar secuencias específicas del ADN. Consta de la proteína Cas9 (tijeras que cortan el ADN) y un ARN guía que dirige a Cas9 a la secuencia a cortar. Este enfoque ha demostrado resultados prometedores en ensayos clínicos para el tratamiento de amiloidosis por transtiretina: enfermedad que da lugar a disfunción progresiva de los órganos, especialmente el corazón y el sistema nervioso.

Estos han hecho uso de la nanotecnología como plataforma de administración (Intellia Therapeutics, Inc., s.f.).

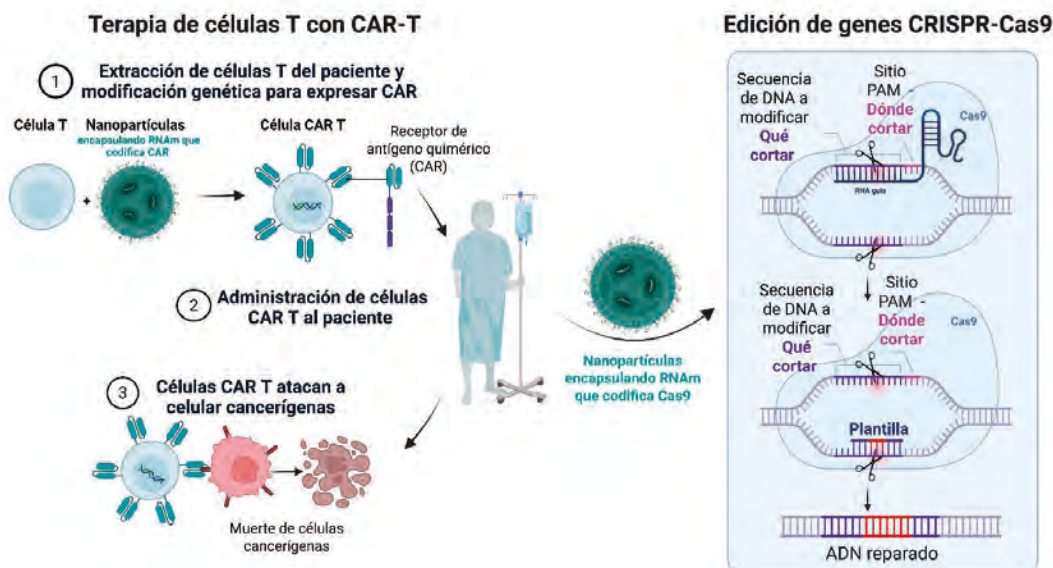


Figura 4. Aplicaciones futuras del ARNm y nanopartículas: terapia con CAR-T y edición genética con CRISPR-Cas9.

El prometedor futuro del ARNm y la nanotecnología dependerá de una gestión constante de factores que acompañan su proceso de desarrollo natural. Algunos de ellos son las consideraciones regulatorias, la seguridad, la logística (ultracongelación y escalabilidad), así como los costes de producción y el acceso universal a estos tratamientos. Actualmente, existen más de 50 productos nanotecnológicos comercializados y cientos de candidatos en fase de desarrollo clínico. Además, el conocimiento generado en el ámbito académico ha crecido de manera exponencial, lo que permite proyectar que, en un futuro cercano, los nanomedicamentos se consolidarán como herramientas terapéuticas clave, contribuyendo no solo a salvar vidas, sino también a mejorar significativamente su calidad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Xunta de Galicia (Grupos de Referencia competitiva 2025, Consellería de Educación e Ordenación Universitaria, Xunta de Galicia, Ref: ED431C 2021/17 y ED431C 2025/01), Consellería de Educación, Ciencia, Universidades e Formación Profesional de la Xunta de Galicia (acreditación ED431G/2023/02), así como cofinanciada por la UE a través del Programa FEDER Galicia 2021-2027. Las figuras han sido creadas con <https://www.BioRender.com>.

Bibliografía

- Anderson, B.R., Muramatsu, H., Nallagatla, S.R., Bevilacqua, P.C., Sansing, L.H., Weissman, D., y Karikó, K. 2010. Incorporation of pseudouridine into mRNA enhances translation by diminishing PKR activation. *Nucleic Acids Research*. 38(17):5884–5892.
- Bangham, A.D. 1995. Surrogate cells or trojan horses. The discovery of liposomes. *Bio-Essays*. 17(12):1081–1088.
- Bernasconi, V., Norling, K., Bally, M., Höök, F., y Lycke, N.Y. 2016. Mucosal vaccine development based on liposome technology. *Journal of Immunology Research*. 2016: 5482087.
- Bot, A., Scharenberg, A., Friedman, K., Guey, L., Hofmeister, R., Andorko, J.I., Klichinsky, M., Neumann, F., Shah, J.V., Swayer, A.J., Trudeau, K., Weissman, D., Stephan, M.T., Buchholz, C.J., y June, C.H. 2025. In vivo chimeric antigen receptor (CAR)-T cell therapy. *Nature Reviews Drug Discovery*. doi: 10.1038/s41573-025-01291-5.
- Cullis, P.R., y Hope, M.J. 2017. Lipid nanoparticle systems for enabling gene therapies. *Molecular Therapy*. 25(7):1467–1475.
- Dimitriadis, G.J. 1978. Translation of rabbit globin mRNA introduced by liposomes into mouse lymphocytes. *Nature*. 274(5674):923–924.
- Everest Medicines. 2025. Everest Medicines announces first patient dosed with EVM16, its first internally developed personalized mRNA cancer vaccine. Disponible en: <https://www.everestmedicines.com/news/everest-medicines-announces-first-patient/8d51d56f-b856-47bd-86e1-61551cb9841b> (Accedido: 13/09/2025).
- Filipić, B., Pantelić, I., Nikolić, I., Majhen, D., Stojić-Vukanić, Z., Savić, S., y Krajišnik, D. 2023. Nanoparticle-based adjuvants and delivery systems for modern vaccines. *Vaccines*. 11(7):1172.
- Hillery, A.M., y Park, K. 2017. *Drug delivery: fundamentals & applications*. CRC Press, Boca Raton, EE.UU.
- Hou, X., Zaks, T., Langer, R., y Dong, Y. 2021. Lipid nanoparticles for mRNA delivery. *Nature Reviews Materials*. 6(12):1078–1094.
- Intellia Therapeutics, Inc. s.f. Intellia announces positive clinical proof-of-concept data for redosing a CRISPR-based therapy with its proprietary LNP-based delivery platform. Disponible en: <https://ir.intelliatx.com/news-releases/news-release-details/intellia-announces-positive-clinical-proof-concept-data-redosing> (Accedido: 10/09/2025).
- Karikó, K., Buckstein, M., Ni, H., y Weissman, D. 2005. Suppression of RNA recognition by Toll-like receptors: the impact of nucleoside modification and the evolutionary origin of RNA. *Immunity*. 23(2):165–175.
- Kon, E., Elia, U., y Peer, D. 2022. Principles for designing an optimal mRNA lipid nanoparticle vaccine. *Current Opinion in Biotechnology*. 73:329–336.

- Langer, R., y Folkman, J. 1976. Polymers for the sustained release of proteins and other macromolecules. *Nature*. 263(5580):797–800.
- Marcos-Villar, L., Perdiguero, B., Anthiya, S., Borrajo, M.L., Lou, G., Franceschini, L., Esteban, I., Sánchez-Cordón, P.J., Zamora, C., Sorzano, C.Ó.S., Jordá, L., Codó, L., Gelpí, J.L., Sisteré-Oró, M., Meyerhans, A., Thielemans, K., Martínez-Jiménez, F., López-Bigas, N., García, F., Alonso, M.J., Plana, M., Esteban, M., y Gómez, C.E. 2024. Modulating the immune response to SARS-CoV-2 by different nano-carriers delivering an mRNA expressing trimeric RBD of the spike protein: COVARNA Consortium. *npj Vaccines*. 9(1):53.
- Merck. 2024. Moderna & Merck announce 3-year data for mRNA-4157 (V940) in combination with KEYTRUDA® (pembrolizumab) demonstrated sustained improvement in recurrence-free survival & distant metastasis-free survival versus KEYTRUDA in patients with high-risk stage III/IV melanoma following complete resection. Disponible en: <https://www.merck.com/news/moderna-and-merck-announce-mrna-4157-v940-in-combination-with-keytruda-pembrolizumab-demonstrated-continued-improvement-in-recurrence-free-survival-and-distant-metastasis-free-survival-in-pa/> (Accedido: 13/07/2025).
- Ostro, M.J., Giacomoni, D., Lavelle, D., Paxton, W., y Dray, S. 1978. Evidence for translation of rabbit globin mRNA after liposomemediated insertion into a human cell line. *Nature*. 274(5674):921–923.
- Qin, S., Tang, X., Chen, Y., Chen, K., Fan, N., Xiao, W., Zheng, Q., Li, G., Teng, Y., Wu, M., y Song, X. 2022. mRNA-based therapeutics: powerful and versatile tools to combat diseases. *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 7(1):166.
- Rowe, S.M., Zuckerman, J.B., Dorgan, D., Lascano, J., McCoy, K., Jain, M., Schechter, M.S., Lommatzsch, S., Indihar, V., Lechtzin, N., McBennett, K., Callison, C., Brown, C., Liou, T.G., MacDonald, K.D., Nasr, S.Z., Bodie, S., Vaughn, M., Meltzer, E.B., y Barbier, A.J. 2023. Inhaled mRNA therapy for treatment of cystic fibrosis: interim results of a randomized, double-blind, placebo-controlled phase 1/2 clinical study. *Journal of Cystic Fibrosis*. 22(4):656–664.
- Shi, S., Zhu, H., Xia, X., Liang, Z., Ma, X., y Sun, B. 2019. Vaccine adjuvants: understanding the structure and mechanism of adjuvanticity. *Vaccine*. 37(24):3167–3178.
- World Health Organization (OMS). 2025. A brief history of vaccines. Disponible en: <https://www.who.int/news-room/spotlight/history-of-vaccination/a-brief-history-of-vaccination#:~:text=Dr%20Edward%20Jenner%20created%20the,cowpox%20were%20immune%20to%20smallpox.&text=In%20May%201796%2C%20English%20physician,the%20hand%20of%20a%20milkmaid> (Accedido: 13/07/2025).
- Wu, F., Li, N., Xiao, Y., Palanki, R., Yamagata, H., Mitchell, M.J., y Han, X. 2025. Lipid nanoparticles for delivery of CRISPR gene editing components. *Small Methods*. en prensa.
- Wu, J., Wu, W., Zhou, B., y Li, B. 2024. Chimeric antigen receptor therapy meets mRNA technology. *Trends in Biotechnology*. 42(2):228–240.

PONIENDO EN CLARO

Proantocianidinas: escudo molecular frente a la hipertrofia cardiaca

Diana Alcubilla Solano^{1,2}, Ileana Bonilauri^{2,3} e Beatriz Martín Fernández^{2,3}.

¹ Graduada en Biotecnología (curso 2021-2025) Facultad de C.C. Biológicas y Ambientales. Universidad de León.

² Área de Biología Celular, Dpto. Biología Molecular, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071, León.

³ Instituto de Desarrollo Ganadero y Sanidad Animal (INDEGSAL), Campus de Vegazana s/n, 24071, León.

dalcusoo@estudiantes.unileon.es; ibon@unileon.es; bmarf@unileon.es

Resumen

Las enfermedades cardiovasculares constituyen la principal causa de mortalidad a nivel mundial. Entre ellas, la hipertrofia cardiaca (HC) representa una de las alteraciones más relevantes, caracterizada por el engrosamiento del músculo cardiaco, el remodelado estructural del miocardio y la pérdida progresiva de su capacidad contráctil. Comprender los mecanismos moleculares que impulsan su progresión, como el estrés oxidativo, la apoptosis y la fibrosis, es fundamental para desarrollar estrategias preventivas dirigidas contra la HC. En este contexto, las proantocianidinas (ProA), compuestos fenólicos de origen vegetal con elevada capacidad antioxidante, han surgido como potenciales agentes cardioprotectores. Diversos estudios preclínicos sugieren que las ProA pueden reducir el estrés oxidativo, disminuir la apoptosis y atenuar el remodelado cardiaco, contribuyendo a preservar la estructura y función del corazón. No obstante, aunque la evidencia es prometedora, se requieren más investigaciones que confirmen su eficacia y profundicen en los mecanismos moleculares implicados en su acción cardioprotectora.

Palabras clave

Apoptosis, estrés oxidativo, hipertrofia cardiaca, polifenoles, proantocianidinas.

Enfermedades cardiovasculares: una amenaza en expansión

Las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte en España. En 2024, un 26,2 % de los fallecimientos estuvieron relacionados con problemas del corazón y los vasos sanguíneos (Instituto Nacional de Estadística,

2024). Estas cifras reflejan la magnitud de un reto sanitario de primer orden, con gran impacto tanto en la salud individual como en los sistemas de salud pública.

El desarrollo de las enfermedades cardiovasculares no depende de un único factor, sino de la compleja interacción entre factores genéticos, condiciones clínicas y hábitos de vida (**Fig. 1**). El tabaquismo, el consumo de alcohol, el sedentarismo o una dieta inadecuada son algunas de las conductas que aumentan notablemente el riesgo. A esto se suman condiciones metabólicas cada vez más frecuentes en la sociedad actual, como la hipercolesterolemia, la obesidad o la diabetes mellitus, que contribuyen al desarrollo de hipertensión arterial y daño vascular (Sociedad Europea de Cardiología, 2024).

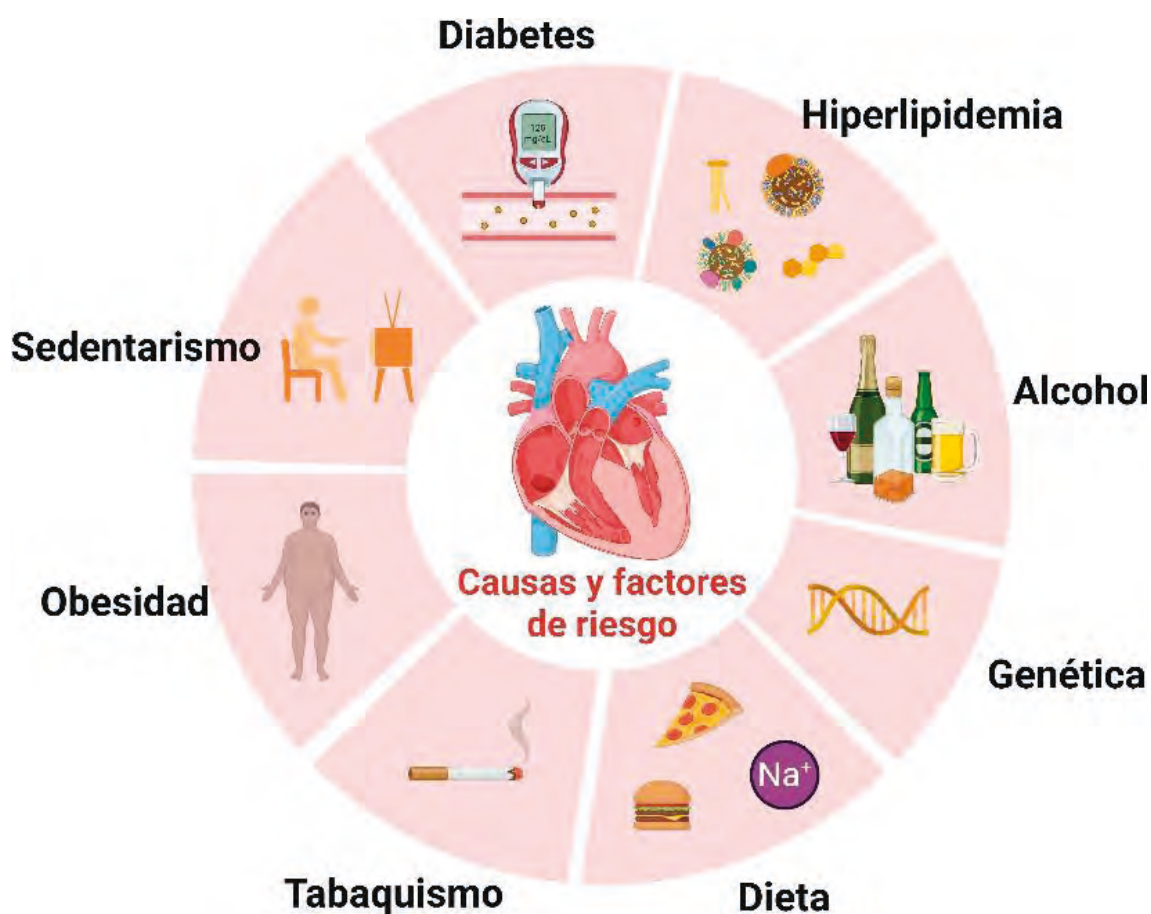


Figura 1. Esquema ilustrativo de los factores de riesgo que contribuyen al desarrollo de enfermedades cardiovasculares. Figura adaptada de Biorender.com.

Las enfermedades cardiovasculares son un gran reto terapéutico, ya que los tratamientos actuales pueden causar efectos adversos y no revierten las lesiones causadas al corazón. Esta situación resalta la necesidad de nuevas estrategias de prevención (Ghatage *et al.*, 2021). En este contexto, los polifenoles han despertado un notable interés por sus efectos cardioprotectores y su potencial como agentes terapéuticos frente a las enfermedades cardíacas (Iqbal *et al.*, 2023).

Hipertrofia cardiaca: cuando la adaptación se convierte en daño

La hipertrofia cardiaca (HC) es una de las alteraciones más frecuentes dentro de las enfermedades cardiovasculares. Constituye una respuesta adaptativa del corazón ante un aumento prolongado de la carga de trabajo o del estrés hemodinámico, condiciones que obligan al músculo cardiaco a trabajar con más intensidad para mantener una función eficiente. Como consecuencia, el corazón presenta un incremento del grosor de las paredes ventriculares y un aumento del tamaño global del corazón (Bazgir *et al.*, 2023). La HC afecta principalmente al ventrículo izquierdo, responsable de impulsar la sangre oxigenada hacia los tejidos del organismo. Esto es debido a que el ventrículo izquierdo se enfrenta a presiones más elevadas que el derecho, lo que implica una mayor carga mecánica y lo hace más susceptible al desarrollo de hipertrofia (Reddy y Bernstein, 2015).

Existen dos tipos principales de HC: fisiológica y patológica. La HC fisiológica aparece en situaciones como el embarazo o en atletas sometidos a entrenamiento de resistencia, donde el corazón se adapta para satisfacer un aumento temporal de la demanda. En este contexto, el ventrículo izquierdo puede aumentar el tamaño de su cavidad y, en menor medida, el grosor de sus paredes, manteniendo una función cardiaca normal. Este tipo de hipertrofia es reversible, por lo que no representa un riesgo a largo plazo para la función cardiaca. En cambio, la HC patológica se asocia a diversos estímulos crónicos perjudiciales que conducen al remodelado del corazón (**Fig. 2**). Este remodelado se caracteriza por el engrosamiento de las paredes cardiacas y la aparición de fibrosis, lo que aumenta la rigidez del músculo cardiaco y reduce su capacidad contráctil (Nakamura y Sadoshima, 2018).

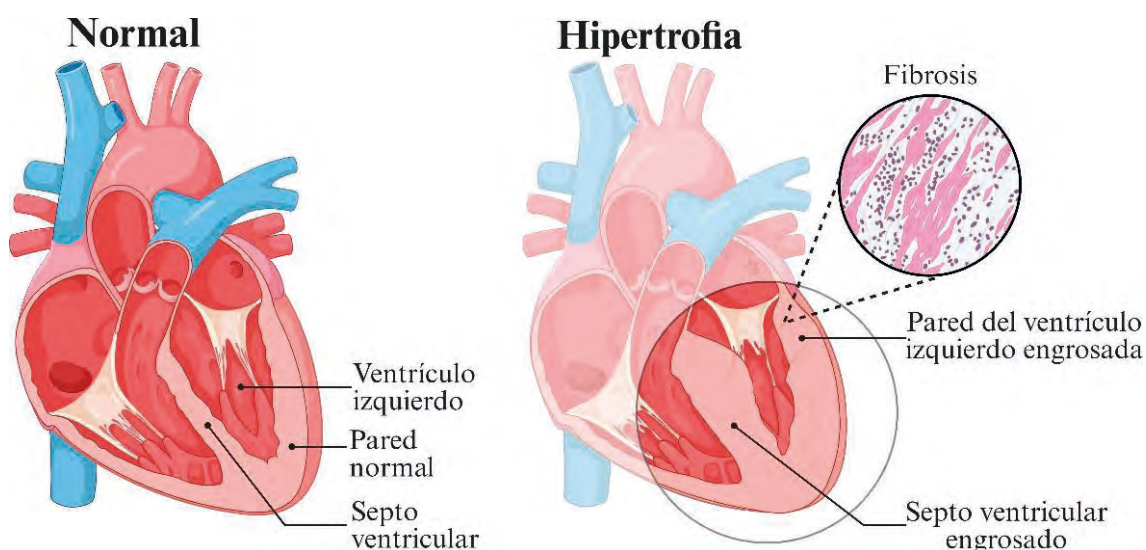


Figura 2. Comparación entre un corazón normal y uno con hipertrofia cardiaca. Se puede observar un engrosamiento de la pared del ventrículo izquierdo y del septo interventricular, acompañado de fibrosis. Figura adaptada de BioRender.com.

Uno de los principales mecanismos implicados en el desarrollo de la HC es la alteración del sistema renina-angiotensina-aldosterona (SRAA), una cascada hormonal que se activa cuando el riñón detecta una disminución del flujo sanguíneo. En condiciones normales, esta activación tiene como objetivo restablecer la presión arterial y garantizar un adecuado suministro de sangre a los tejidos. Uno de sus componentes clave es la angiotensina II (Ang II), hormona que ejerce una potente acción vasoconstrictora, aumentando así la presión arterial. Además, la Ang II estimula la secreción de aldosterona, hormona que actúa en los riñones favoreciendo la reabsorción de sodio y agua, lo que incrementa el volumen sanguíneo y contribuye a elevar aún más la presión arterial (Bhullar y Dhalla, 2022).

Sin embargo, en condiciones patológicas, cuando el SRAA permanece activado de manera crónica, la presión arterial se eleva por encima de los valores normales, dando lugar a hipertensión arterial (HTA). Esta patología, comúnmente conocida como el “asesino silencioso”, suele cursar sin síntomas evidentes durante años, lo que retrasa su diagnóstico y aumenta el riesgo de complicaciones cardiovasculares (Organización Mundial de la Salud, 2023). La HTA sostenida obliga al corazón, especialmente al ventrículo izquierdo, a ejercer una mayor fuerza de contracción para vencer la presión aumentada de la circulación sistémica. Este esfuerzo constante provoca una sobrecarga mecánica que favorece el desarrollo de HC (Akhtar *et al.*, 2022).

Si no se controla, la HC patológica puede progresar hacia insuficiencia cardíaca y arritmias graves, además de aumentar el riesgo de insuficiencia renal, accidentes cerebrovasculares y deterioro cognitivo. En los casos más severos, puede incluso conducir a muerte súbita (Ren *et al.*, 2020).

Fisiopatología de la hipertrofia cardíaca

La HC se caracteriza por un aumento del tamaño de los cardiomiocitos, con un incremento de su diámetro tanto transversal como longitudinal, junto con una mayor acumulación y desorganización de la matriz extracelular. Estos cambios estructurales permiten, en las fases iniciales, mantener un flujo sanguíneo adecuado frente a la sobrecarga hemodinámica (Bazgir *et al.*, 2023). Sin embargo, cuando este esfuerzo se prolonga durante demasiado tiempo, la adaptación inicial del corazón deja de ser beneficiosa y se vuelve perjudicial. La HC avanza y comienzan a producirse alteraciones tisulares, como la fibrosis. Estos procesos terminan modificando la estructura del corazón, dificultando su contracción y favoreciendo el desarrollo de insuficiencia cardíaca y arritmias (Ren *et al.*, 2020).

A nivel molecular, la hipertrofia es el resultado de la activación de múltiples rutas metabólicas, desencadenadas por señales mecánicas u hormonales, que intentan mantener la función del corazón bajo condiciones de estrés. Estas vías de señalización regulan la expresión de genes implicados en el crecimiento, la supervivencia y la respuesta al estrés celular (**Fig. 3**), dando lugar a diversas adaptaciones moleculares asociadas a la HC (Shimizu y Minamino, 2016).

Entre los principales marcadores de HC se encuentran el péptido natriurético ventricular (*Anp*) y el péptido natriurético cerebral (*Bnp*), cuyos niveles aumentan cuando las paredes del corazón se estiran. Estas moléculas funcionan como señales químicas que advierten de la sobrecarga cardíaca y son utilizadas en la práctica clínica y en la investigación como indicadores de HC (Ren *et al.*, 2023). Otro marcador característico es la cadena pesada de miosina beta (β -*Mhc*), que reemplaza a la isoforma alfa (α -*Mhc*) durante la HC patológica, reduciendo la velocidad y eficiencia de la contracción cardíaca (Turkieh *et al.*, 2024).

La apoptosis, o muerte celular programada, constituye uno de los procesos celulares más relevantes en la progresión de la HC. En condiciones patológicas, la Ang II y otros mediadores hipertensivos alteran el equilibrio entre las señales de supervivencia y de muerte celular. Este desequilibrio se refleja en un aumento de la expresión de genes proapoptóticos, como el gen de la proteína X asociada a BCL-2 (*Bax*), y en una reducción de la expresión de genes antiapoptóticos, como el gen del linfoma de células B2 (*Bcl-2*). Como resultado, se activan vías intracelulares que conducen a la muerte progresiva de los cardiomiocitos (Ren *et al.*, 2023).

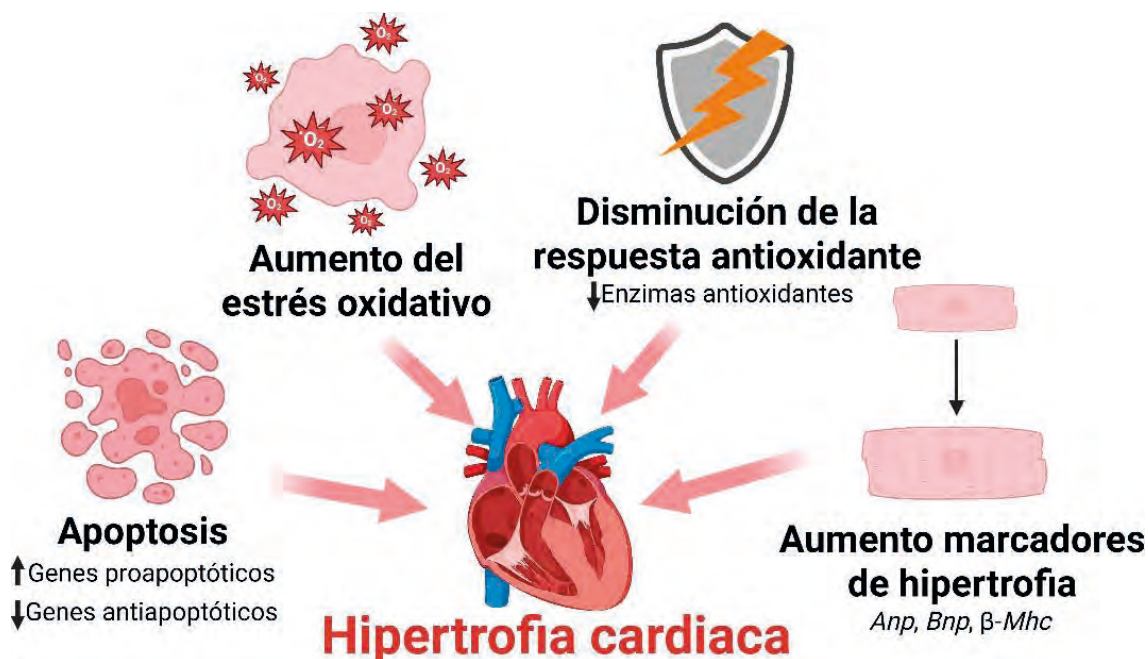


Figura 3. Principales mecanismos moleculares y celulares implicados en la hipertrofia cardíaca, incluyendo la apoptosis, el estrés oxidativo y el aumento de los marcadores de hipertrofia. *Anp*: gen del péptido natriurético auricular; β -*Mhc*: gen de la cadena pesada de miosina beta; *Bnp*: gen del péptido natriurético cerebral. Imagen de elaboración propia con Biorender.com.

Junto con la apoptosis, el estrés oxidativo constituye otro de los mecanismos clave en la progresión de la HC, caracterizado por un aumento de las especies reactivas de oxígeno (EROs). A este incremento de EROs se suma una

disminución de los sistemas antioxidantes del corazón, como la menor expresión de las enzimas superóxido dismutasa (SOD) y glutatión peroxidasa (GSH-Px), lo que favorece la acumulación de EROs. El exceso de estas moléculas daña los cardiomiocitos, afectando a sus membranas, mitocondrias y ADN, contribuyendo al deterioro progresivo del tejido cardíaco (Nakamura y Sadoshima, 2018). Por este motivo, numerosas investigaciones están investigando el efecto de diversos compuestos antioxidantes capaces de frenar el estrés oxidativo, entre los cuales destacan los polifenoles por su alta actividad antioxidante y un prometedor efecto cardioprotector (Hedayati *et al.*, 2023).

Polifenoles: compuestos bioactivos con actividad antioxidante

En los últimos años, los polifenoles han despertado un creciente interés por su papel en la salud humana, especialmente en la protección cardiovascular. Estos compuestos son metabolitos secundarios de las plantas, es decir, sustancias que las plantas producen no para su crecimiento, sino como mecanismo de defensa frente al estrés ambiental, las radiaciones o los microorganismos. En el ser humano, esa misma capacidad protectora parece traducirse en múltiples beneficios para la salud (Lambert *et al.*, 2021; Hedayati *et al.*, 2023).

Desde el punto de vista químico, los polifenoles se caracterizan por tener más de un grupo fenólico en su estructura y se originan a partir de varias rutas metabólicas vegetales (Hedayati *et al.*, 2023). Hasta la fecha, se han identificado más de 500 tipos diferentes en alimentos de origen vegetal, lo que los convierte en uno de los grupos de fitoquímicos más abundantes en la dieta (Lambert *et al.*, 2021). Su clasificación se basa en la cantidad y disposición de los anillos aromáticos que forman su estructura. Se agrupan principalmente en flavonoides, ácidos fenólicos, estilbenos y lignanos. Entre ellos, los flavonoides son los más comunes y se encuentran en frutas, verduras, cacao, vino tinto o té verde (Hedayati *et al.*, 2023).

Entre sus múltiples funciones biológicas, los polifenoles destacan por su potente acción antioxidante, debido a su alta densidad de grupos hidroxilo (-OH), capaces de neutralizar radicales libres y disminuir el estrés oxidativo. Además, diversos estudios han mostrado que también pueden ejercer efectos antiinflamatorios, antiapoptóticos, antimicrobianos y antihiperlipidémicos, lo que los convierte en candidatos terapéuticos prometedores para distintas afecciones metabólicas y cardiovasculares. En conjunto, los polifenoles podrían modular distintos mecanismos implicados en la HC, constituyendo un campo de investigación con gran potencial para el desarrollo de nuevas estrategias preventivas y terapéuticas (Hedayati *et al.*, 2023).

Proantocianidinas: aliadas del corazón frente al estrés celular

Dentro de la amplia familia de los polifenoles, las proantocianidinas (ProA) destacan por su notable capacidad antioxidante y su posible papel car-

dioprotector (**Fig. 4**). Estas moléculas pertenecen al grupo de los flavonoides y están formadas por la unión de varias unidades de flavan-3-ol, una estructura que les confiere una alta eficacia en la neutralización de radicales libres (Martín-Fernández *et al.*, 2014).

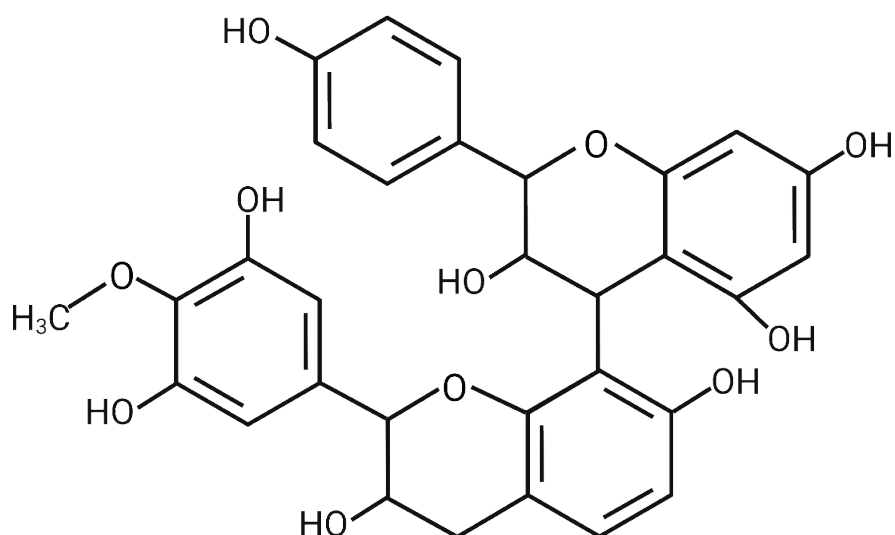


Figura 4. Estructura química de las proantocianidinas. Imagen de elaboración propia con Biorender.com.

Además de su acción antioxidante, las ProA han demostrado en varios estudios poseer propiedades antiinflamatorias, inmunomoduladores, antibacterianas y vasoprotectoras, lo que refuerza su interés como compuestos naturales con potencial terapéutico (Xie *et al.*, 2023).

Mecanismo de actuación de las proantocianidinas

Aunque las ProA se han consolidado como compuestos con una potente acción antioxidante, los estudios sobre su efecto directo en la HC aún son limitados. Sin embargo, la evidencia preclínica acumulada en los últimos años apunta a que podrían desempeñar un papel relevante en la protección del miocardio frente a los mecanismos que impulsan su deterioro: el estrés oxidativo, la apoptosis y el remodelado estructural.

Las ProA restauran el equilibrio redox y protegen al miocardio del daño oxidativo

En un modelo celular de epitelio de ratón sometido a estrés oxidativo, el tratamiento con ProA aumentó la actividad de las enzimas antioxidantes SOD y GSH-Px. Esto fortaleció las defensas de las células frente a EROs y redujo el daño oxidativo (Long *et al.*, 2018). Resultados similares se observaron en ratones obesos alimentados con una dieta rica en grasas, en los que la administración de un extracto de semilla de açaí (fuente natural de ProA) redujo el daño oxidativo e

incrementó la expresión de SOD-1, GSH-Px y catalasa, restaurando la capacidad antioxidante del miocardio (de Moraes Arnosso *et al.*, 2022).

Estos hallazgos sugieren que las ProA no solo neutralizan radicales libres, sino que también reactivan los sistemas antioxidantes endógenos, ofreciendo una doble línea de defensa frente al estrés oxidativo sostenido.

Las ProA reducen la apoptosis y preservan la viabilidad celular en el corazón

La apoptosis constituye un proceso clave en la progresión de HC hacia la insuficiencia cardíaca. En este contexto, distintos modelos experimentales han mostrado que las ProA poseen un fuerte efecto cardioprotector.

En un estudio con condrocitos de ratón expuestos a estrés oxidativo, la administración de ProA redujo significativamente la apoptosis. Además, se observó que las células estimuladas con ProA conservaban mejor su estructura y viabilidad, posiblemente debido a un mecanismo protector mediado por la regulación de proteínas implicadas en la supervivencia celular (Yin *et al.*, 2017).

De forma similar, en ratas tratadas con aldosterona, la administración de un extracto rico en ProA disminuyó la apoptosis miocárdica y redujo los mediadores oxidativos asociados al daño cardíaco. Asimismo, se observó una mejor conservación de la estructura del tejido y una menor progresión del remodelado patológico (Martín-Fernández *et al.*, 2014).

En conjunto, los resultados apoyan la hipótesis de que las ProA podrían contribuir a preservar la viabilidad de los cardiomiocitos, frenando la pérdida progresiva de tejido funcional.

Las ProA atenúan el remodelado cardíaco y modulan marcadores de HC

Más allá del estrés oxidativo y la apoptosis, las ProA también parecen influir directamente sobre el remodelado estructural del corazón. En ratas tratadas con isoproterenol, un agente que induce HC, el tratamiento con un extracto de semilla de uva rico en ProA mejoró la función cardíaca. Los principales hallazgos fueron que se redujo el peso del ventrículo izquierdo, el tamaño de los cardiomiocitos y la acumulación de colágeno (Zuo *et al.*, 2011). Estos resultados sugieren que las ProA podrían limitar la remodelación patológica del miocardio y contribuir a preservar la estructura y función del corazón frente a la sobrecarga crónica.

Respecto a los marcadores de hipertrofia, actualmente no hay estudios que analicen específicamente su relación con las ProA. No obstante, sí que hay investigaciones sobre el efecto de los polifenoles en la HC. En un estudio con ratas tratadas con isoproterenol, la administración de un extracto rico en polifenoles redujo los niveles de los marcadores de hipertrofia (*Anp*, *Bnp* y β -*Mhc*) y mejoró la función cardíaca (Kumari *et al.*, 2020). Aunque este estudio no se centra exclusivamente en las ProA, sus resultados respaldan la hipótesis de que los compuestos fenólicos de origen vegetal podrían modular la expresión de ciertos genes relacionados con la HC, como *Anp*, *Bnp* y β -*Mhc*.

Conclusión

En conjunto, la evidencia actual sugiere que las proantocianidinas ejercen un efecto protector multifactorial frente a los procesos que promueven el desarrollo de la hipertrofia cardíaca. Su capacidad para reducir el estrés oxidativo, disminuir la apoptosis y atenuar el remodelado estructural las posiciona como compuestos con un notable potencial cardioprotector (**Fig. 5**).



Figura 5. Mecanismos implicados en la acción cardioprotectora de las proantocianidinas, destacando su papel en la disminución de la muerte celular, la atenuación del remodelado cardíaco y la restauración del equilibrio redox. Imagen de elaboración propia.

A pesar de estos resultados prometedores, la evidencia disponible sigue siendo limitada y procede en gran medida de estudios preclínicos realizados en modelos animales o celulares, lo que dificulta su extrapolación directa al ser humano. Por ello, es necesario profundizar en el mecanismo de acción de las proantocianidinas, identificando las rutas metabólicas y de señalización que modulan, y aclarando su impacto sobre la progresión de la hipertrofia cardíaca. Avanzar en esta línea de investigación permitiría establecer una base más sólida para evaluar el potencial preventivo y terapéutico de las proantocianidinas frente la hipertrofia cardíaca en el contexto clínico.

Bibliografía

- Akhtar, H., Al Sudani, H., Hussein, M., Farhan, M. U. N. *et al.* 2022. Effects of renin- angiotensin-aldosterone system inhibition on left ventricular hypertrophy, diastolic function, and functional status in patients with hypertrophic cardiomyopathy: a systematic review. *Cureus*, 14(7):e26642.
- Bazgir F., Nau, J., Nakhaei-Rad, S., Amin, E. *et al.* 2023. The microenvironment of the pathogenesis of cardiac hypertrophy. *Cells*, 12(13):1780.
- Bhullar, S. K. y Dhalla, N. S. 2022. Angiotensin II-induced signal transduction mechanisms for cardiac hypertrophy. *Cells*, 11(21):3336.
- de Moraes Arnoso, B. J., Magliaccio, F. M., de Araújo, C. A., de Andrade Soares, R. *et al.* 2022. Açaí seed extract (ASE) rich in proanthocyanidins improves cardiovascular remodeling by increasing antioxidant response in obese high-fat diet-fed mice. *Chemico-Biological Interactions*, 351:109721.
- Ghatage, T., Goyal, S. G., Dhar, A. y Bhat, A. 2021. Novel therapeutics for the treatment of hypertension and its associated complications: peptide- and nonpeptide-based strategies. *Hypertension research*, 44(7):740-755.
- Hedayati, N., Yaghoobi, A., Salami, M., Gholinezhad, Y. *et al.* 2023. Impact of polyphenols on heart failure and cardiac hypertrophy: clinical effects and molecular mechanisms. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 10:1174816.
- Instituto Nacional de Estadística. 2024. Estadística de defunciones según la causa de muerte. Primer semestre 2024. Datos provisionales. Disponible en: <https://www.ine.es/dyngs/Prensa/EDCM2023.htm> (acceso: 6/10/2025).
- Iqbal, I., Wilairatana, P., Saqib, F., Nasir, B. *et al.* 2023. Plant polyphenols and their potential benefits on cardiovascular health: a review. *Molecules*, 28(17):6403.
- Kumari, S., Katare, P. B., Elancheran, R., Nizami, H. L. *et al.* 2020. *Musa balbisiana* fruit rich in polyphenols attenuates isoproterenol-induced cardiac hypertrophy in rats via inhibition of inflammation and oxidative stress. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020:7147498.
- Lambert, K., Demion, M., Lagacé, J. C., Hokayem, M. *et al.* 2021. Grape polyphenols and exercise training have distinct molecular effects on cardiac hypertrophy in a model of obese insulin-resistant rats. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 87:108522.
- Martín-Fernández, B., de las Heras, N., Valero-Muñoz, M., Ballesteros, S. *et al.* 2014. Beneficial effects of proanthocyanidins in the cardiac alterations induced by aldosterone in rat heart through mineralocorticoid receptor blockade. *PLOS One*, 9(10):e111104.
- Nakamura, M. y Sadoshima, J. 2018. Mechanisms of physiological and pathological cardiac hypertrophy. *Nature Reviews Cardiology*, 15(7):387-407.
- Organización Mundial de la Salud. 2023. Global report on hypertension: the race against a silent killer. 1.^a ed. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.

- Reddy, S. y Bernstein, D. 2015. Molecular mechanisms of right ventricular failure. *Circulation*, 132(18):1734-1742.
- Ren, S., Wang, Y., Zhang, Y., Yan, P. *et al.* 2023. Paeoniflorin alleviates angII-induced cardiac hypertrophy in H9c2 cells by regulating oxidative stress and Nrf2 signaling pathway. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 165:115253.
- Ren, Z., Yu, P., Li, D., Li, Z. *et al.* 2020. Single-cell reconstruction of progression trajectory reveals intervention principles in pathological cardiac hypertrophy. *Circulation*, 141(21):1704-1719.
- Shimizu, I. y Minamino, T. 2016. Physiological and pathological cardiac hypertrophy. *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, 97:245-262.
- Sociedad Europea de Cardiología. 2024. Guía ESC 2024 sobre el manejo de la presión arterial elevada y la hipertensión. 1.^a ed. Bruselas: ESC Publications.
- Turkieh, A., Weber, L., Chwastyniak, M., Baydar, S. *et al.* 2024. Regulation of clusterin in the heart and plasma of mice after transverse aortic constriction. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*, 28(23):e70290.
- Xie, Y., Deng, Q., Guo, M., Li, X. *et al.* 2023. Proanthocyanidins: a novel approach to Henoch Schonlein purpura through balancing immunity and arresting oxidative stress via TLR4/MyD88/NF κ B signaling pathway. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 25(6):300.
- Yin, M. H., Wang, Y. T., Li, Q., y Lv, G. F. 2017. Oligomeric proanthocyanidins inhibit apoptosis of chondrocytes induced by interleukin-1 β . *Molecular Medicine Reports*, 16(4):4195-4200.
- Zuo, Y. M., Wang, X. H., Gao, S., y Zhang, Y. 2011. Oligomerized grape seed proanthocyanidins ameliorates isoproterenol-induced cardiac remodeling in rats: role of oxidative stress. *Phytotherapy Research*, 25(5):732-739.

Presencia, problemática y eliminación de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas en el agua: adsorción mediante carbón activado.

Celia Pol Bodelón¹, Marta Otero Cabero²

¹Graduada en Ciencias Ambientales por la Universidad de León. cpolbooo@estudiantes.unileon.es

²Departamento de Química y Física Aplicadas. Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales. Universidad de León. Campus de Vegazana, 24071 León. marta.otero@unileon.es

Resumen

Los compuestos per- y polifluoroalquilados (PFAS), son contaminantes de gran preocupación, por su alta resistencia a la degradación, toxicidad y capacidad de bioacumulación. Este trabajo tiene como objetivo analizar y caracterizar los PFAS mediante una revisión bibliográfica, basada en literatura científica reciente. Se estudian sus propiedades químicas, estructura molecular, comportamiento en el medio ambiente, vías de entrada y efectos sobre los seres humanos. Así mismo, se revisa la normativa vigente nacional e internacional, y las tecnologías de eliminación disponibles, con especial atención a la adsorción con carbón activado (en forma granular y en polvo). Este tipo de tratamiento destaca por su eficiencia en la retención de PFAS en el agua, aunque presenta limitaciones como la saturación rápida y la generación de residuos. En conclusión, los PFAS constituyen una amenaza directa, y esta revisión evidencia la necesidad de una mayor prevención, regulación estricta y desarrollo de tecnologías sostenibles para su eliminación.

Palabras clave

Carbón activado, compuestos perfluoroalquilados, compuestos polifluoroalquilados, microcontaminantes, procesos de adsorción, tratamiento avanzado de aguas residuales.

Introducción

En las últimas décadas, la contaminación ambiental se ha convertido en una de las mayores preocupaciones globales, especialmente en el medio acuático. El agua es un recurso esencial para la vida: permite el correcto funcionamiento de los ecosistemas, transporta nutrientes, regula la temperatura y el pH, y constituye la base de todos los procesos biológicos (Dargaville y Hutmacher, 2022). Sin embargo, la creciente presencia de contaminantes amenaza su calidad y, por tanto, la salud de los seres vivos y la estabilidad de los ecosistemas.

Actualmente, entre los contaminantes más preocupantes del agua se encuentran las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas, conocidas como PFAS (del inglés *Per- and Polyfluoroalkyl Substances*). Estos compuestos, también conocidos como “químicos eternos”, se caracterizan por su enorme resistencia a la degradación y su capacidad para acumularse en los organismos vivos (*European Environment Agency, 2023*). Desde su introducción industrial en los años 40, los PFAS han estado presentes en productos cotidianos como sartenes antiadherentes, tejidos impermeables, envases de alimentos o espumas contra incendios (*Barry et al., 2013*). Su uso masivo ha permitido que se extiendan por todo el planeta, siendo las aguas un medio de dispersión y transporte de PFAS en el ambiente (*Sörengård et al., 2022; Wang et al., 2025*).

En el contexto descrito, el presente trabajo tuvo como objetivos: i) describir las propiedades químicas y la estructura molecular de las PFAS para comprender su comportamiento y persistencia ambiental; ii) identificar las principales vías de entrada de los PFAS en el medio ambiente y, evaluar el impacto ambiental de los PFAS, con especial atención a su bioacumulación, movilidad y efectos sobre los organismos; iii) analizar la exposición humana a los PFAS y los riesgos potenciales para la salud así como revisar la normativa nacional e internacional existente en relación con los PFAS; y iv) destacar la importancia de llevar a cabo y enumerar distintos tratamientos eficientes para eliminar los PFAS del agua, analizando con más detalle los procesos de adsorción mediante carbón activado.

Propiedades químicas y estructura molecular

Los PFAS forman una gran familia de compuestos químicos caracterizados por la presencia de una cadena de átomos de carbono en la que los hidrógenos han sido sustituidos total o parcialmente por flúor (*Rodríguez-Jorquera et al., 2015*). Este enlace carbono-flúor es uno de los más fuertes en la química orgánica, lo que explica la extrema estabilidad de estas sustancias. Esa fortaleza química hace que los PFAS sean prácticamente indestructibles bajo condiciones naturales, resistiendo el calor, la radiación o la acción microbiana.

Las moléculas de PFAS tienen dos partes bien diferenciadas: una cabeza polar (hidrofilica) y una cola fluorada apolar (hidrofóbica). Esta combinación les otorga propiedades únicas, como repeler el agua y los aceites, o reducir la tensión superficial de los líquidos. Por eso han sido tan útiles en la industria: desde recubrimientos y textiles hasta envases alimentarios o productos cosméticos. En la **Figura 1** se muestra la estructura química del ácido perfluorodecanoico (PFDA ($C_9F_{19}COOH$)), compuesto que presenta una cadena de diez átomos de carbono.

Existen cientos de tipos de PFAS, que se clasifican según la longitud de su cadena de carbono. Los de cadena corta (C_3 - C_6) son más solubles en agua y por ello, tienen mayor tendencia a la dispersión en el ambiente; los de cadena larga ($>C_6$), por el contrario, se acumulan más en los organismos vivos (debido a su afinidad por las proteínas y baja tasa de eliminación renal). Además, pueden

presentarse en estructuras lineales o ramificadas, lo que también influye en su comportamiento químico y biológico.

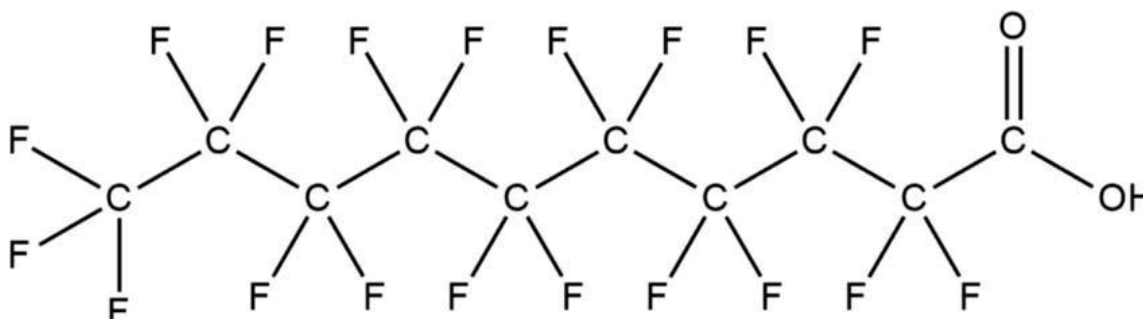


Figura 1. Estructura química del ácido perfluorodecanoico (PFDA) (Macheka-Tendenguwo *et al.*, 2018).

Dentro de esta gran familia se pueden distinguir también los PFAS poliméricos y los no poliméricos (Billmeyer, 2020). Los primeros son moléculas de gran tamaño, sólidos, estables y con menor movilidad ambiental. Es el caso, por ejemplo, del PTFE (politetrafluoroetileno), conocido comercialmente como Teflón®, o del PVDF (polifluoruro de vinilideno). Los segundos, mucho más preocupantes desde el punto de vista ambiental, son moléculas más pequeñas, móviles (tanto en agua como aire) y persistentes, que tienden a bioacumularse y provocan efectos perjudiciales en la salud. Entre ellos se encuentran los dos más conocidos y estudiados como contaminantes: el PFOA (ácido perfluorooctanoico) y el PFOS (sulfonato de perfluorooctano) (Abunada *et al.*, 2020). Tanto PFOA como PFOS son solubles, estables, tóxicos y con vidas medias que pueden superar los tres años en el cuerpo humano. Hay que señalar que, los PFAS poliméricos pueden ser una fuente indirecta de PFAS no poliméricos durante su producción, uso (envejecimiento) o eliminación (por ejemplo, en procesos de incineración).

Origen e impacto en el medio ambiente

Los PFAS no se encuentran de forma natural en la Tierra: su origen es exclusivamente antropogénico, ya que no existen fuentes naturales conocidas de estas sustancias en el ambiente. Se empezaron a fabricar en los años 40 mediante dos procesos principales: la fluoración electroquímica y la telomerización (Dhore y Murthy, 2021). La empresa estadounidense 3M fue pionera en su desarrollo y producción (PFAS Facts, 2019). Poco después, compañías como DuPont comenzaron a fabricar el famoso teflón, un producto que se convirtió en símbolo de la modernidad doméstica y que, sin saberlo, expandió los PFAS por el mundo (Dhore y Murthy, 2021).

Con el tiempo, las PFAS se empezaron a emplear en una infinidad de sectores: desde la construcción hasta la electrónica, pasando por la cosmética o la industria alimentaria (Glüge *et al.*, 2020). Durante décadas se consideraron

seguras, hasta que a comienzos de los años 2000 empezaron a detectarse en animales y en humanos de forma generalizada (PFAS Facts, 2019). A raíz de esos hallazgos, 3M y otras compañías comenzaron a retirar progresivamente algunos de sus productos más contaminantes, aunque muchos otros PFAS siguieron y siguen utilizándose en la actualidad.

Los PFAS pueden liberarse al medio ambiente durante cualquier etapa de su ciclo de vida: desde la fabricación industrial hasta el vertido de residuos o el uso de productos que los contienen (Navarro Martín, 2018). Las fuentes de contaminación se clasifican en: puntuales, como las industrias o estaciones depuradoras de aguas residuales; y difusas, más difíciles de identificar, como la degradación de productos domésticos o el transporte atmosférico (Perera y Meegoda, 2024). En la **Figura 2**, se muestra el ciclo de los PFAS en el agua.

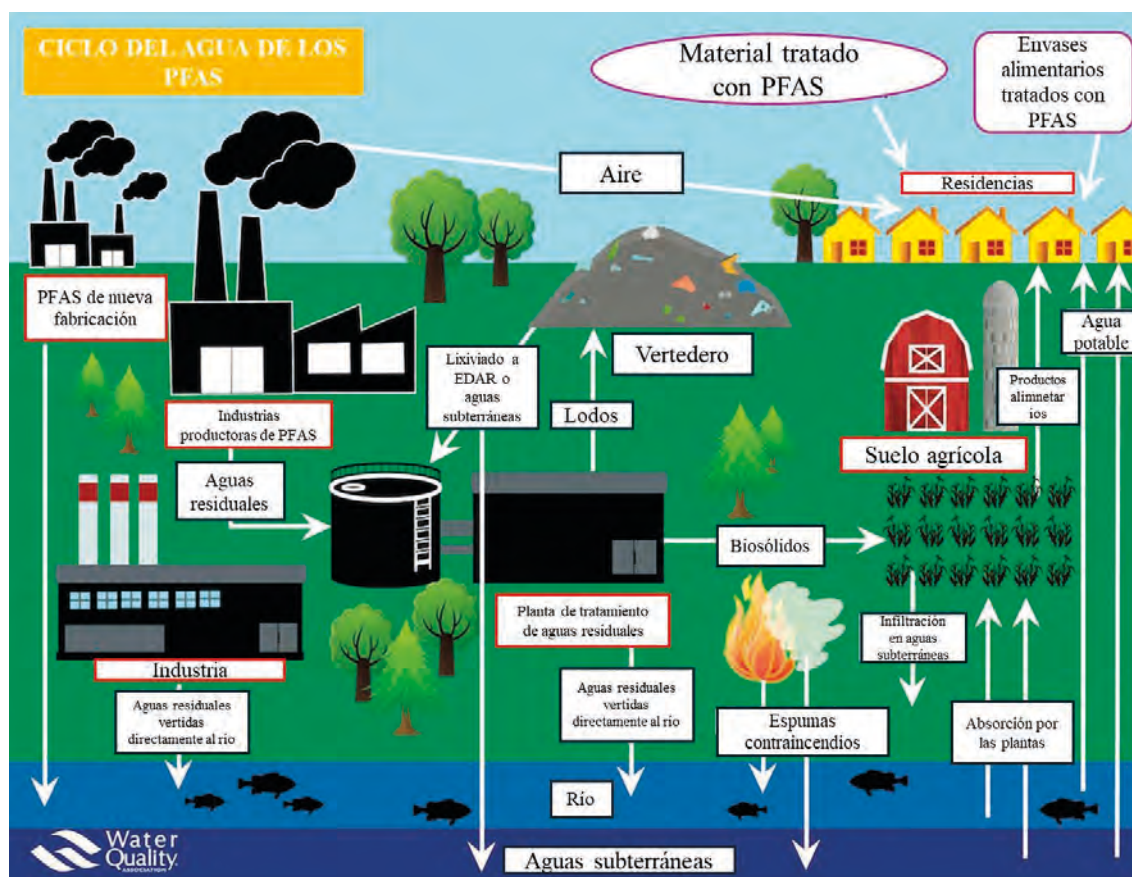


Figura 2. Ciclo del agua de los PFAS, adaptado de Indalo (2023).

Entre las fuentes más importantes están los vertederos, donde los productos con PFAS se descomponen lentamente y liberan lixiviados que contaminan aguas subterráneas; las actividades militares, por el uso de espumas contra incendios; y las propias estaciones depuradoras de aguas residuales, que no solo no eliminan completamente estos compuestos, sino que pueden transformarlos

en formas aún más persistentes. A través de los lodos de depuradora, que se reutilizan en agricultura, los PFAS regresan al suelo, cerrando un ciclo de contaminación que parece no tener fin.

Exposición y riesgos para la salud humana

La exposición humana a PFAS puede producirse por distintas vías, siendo la más importante el consumo de agua potable contaminada (DeLuca *et al.*, 2022). También pueden ingerirse a través de alimentos, especialmente pescados, mariscos, huevos o productos envasados. Otras fuentes de exposición son el aire, el polvo doméstico o el contacto con cosméticos y productos de limpieza.

Una vez dentro del cuerpo, los PFAS que, a diferencia de otros contaminantes orgánicos persistentes (COPs), no son liposolubles, se unen a proteínas en la sangre y se acumulan en órganos como el hígado o los riñones (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2021). Pueden permanecer en el organismo durante años, dependiendo del tipo de compuesto (Qi *et al.*, 2022).

Los efectos negativos de las PFAS sobre la salud son amplios. Se han relacionado con alteraciones del sistema hormonal, problemas en el desarrollo fetal, reducción de la fertilidad, aumento del colesterol, daños hepáticos e incluso mayor riesgo de ciertos tipos de cáncer (Panieri *et al.*, 2022). En la **Figura 3**, se muestra un esquema general, que indica las diversas enfermedades y daños que los PFAS pueden causar en los órganos, señalando los riesgos más significativos tanto en hombres como en mujeres, así como los posibles efectos en el desarrollo del feto.

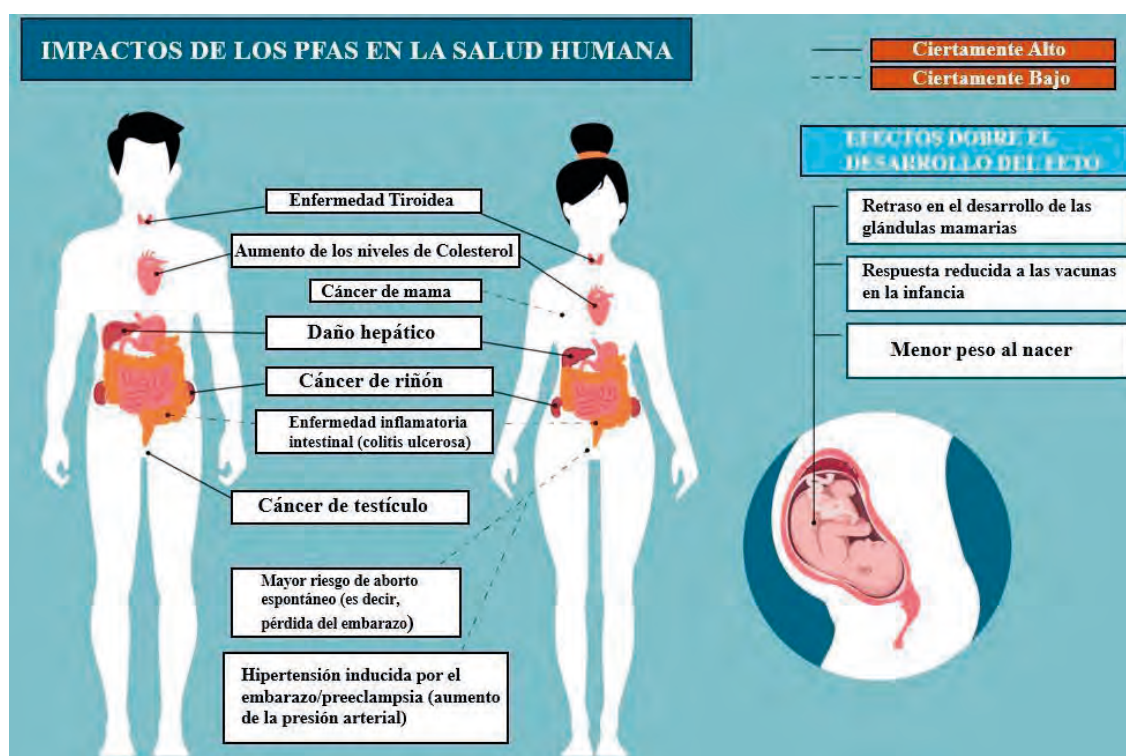


Figura 3. Impactos de los PFAS en la salud humana, adaptado de Jedra (2023).

Además de los efectos referidos, recientemente se ha comprobado que pueden afectar al sistema inmunitario, reduciendo la eficacia de las vacunas en niños (Adewuyi y Li, 2024). Los estudios en animales y modelos informáticos confirman su elevada toxicidad y capacidad de bioacumulación (Dickman y Aga, 2022).

Normativa

Debido a la creciente preocupación a nivel global por la presencia de PFAS en el medio ambiente, las autoridades tanto nacionales como europeas han adoptado una serie de medidas normativas orientadas a limitar su presencia en el agua, los alimentos y los ecosistemas. La alta bioacumulación, persistencia y toxicidad han obligado a reforzar los sistemas de vigilancia y establecer límites legales que garanticen la protección de la salud humana.

En cuanto a la legislación sobre aguas, la Directiva Marco del agua (2000/60/CE), por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, es la base de toda la legislación sobre el agua en la Unión Europea. Aunque no menciona explícitamente la familia de los PFAS, sí obliga a todos los estados a controlar sustancias peligrosas como el PFOS, considerado prioritario (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2000). La Directiva (UE) 2020/2184 del 16 de diciembre de 2020, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano, fija la obligación de control para PFAS bajo dos parámetros analíticos, la suma de PFAS (límite de 0,10 µg/L) y el total de PFAS (límite de 0,50 µg/L). La suma de PFAS incluye un grupo específico de compuestos de preocupación, por ejemplo, el ácido perfluorohexanoico (PFHxA), el ácido perfluorodecanoico (PFDA), el ácido perfluorobutano sulfónico (PFBS), entre otros. Por el contrario, el total de PFAS engloba el total de la concentración de PFAS (sin importar su cadena o estructura). Sin embargo, esta Directiva (UE) 2020/2184 no detalla un método analítico concreto para cuantificar el total de PFAS, lo cual implica que cada Estado miembro puede elegir la metodología que considere más adecuada (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2020).

En el caso específico de nuestro país, el Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, establece los criterios técnico-sanitarios relativos a la calidad del agua de consumo, su control y suministro (Boletín Oficial del Estado, 2023). Esta normativa introduce por primera vez límites legales para determinadas PFAS, entre las que se encuentran: PFOA, PFOS, PFNA y PFHxS. El incumplimiento de estos valores (0,07 µg/L) implica que el agua no es apta para el consumo o requiere tratamiento adicional.

Tratamientos para la eliminación del agua: adsorción mediante carbón activado

Eliminar los PFAS del agua es una tarea compleja debido a su resistencia a la degradación. Los métodos tradicionales de tratamiento, como los lodos activados o la cloración, no son eficaces. Por ello, se necesita la implementación

tecnologías de tratamiento avanzadas como el intercambio iónico, la ósmosis inversa, la nanofiltración o la adsorción con carbón activado. Cada una de estas tecnologías presenta ventajas y limitaciones, y su eficiencia depende de múltiples factores, como el tipo de PFA, la longitud de la cadena, las características del agua a tratar o el material utilizado, entre otros (Bayode *et al.*, 2024). Sin embargo, El Convenio de Estocolmo recomienda el uso de carbón activado como la mejor tecnología disponible para eliminar los PFAS (Desotec, 2023). Varios trabajos han destacado las ventajas del tratamiento de adsorción para la eliminación de PFAS del agua, señalando que es el proceso de adsorción más eficaz y respetuoso con el medio ambiente (Hussain *et al.*, 2025), además de tener una relación costo-eficiencia más favorable que otros procesos de eliminación (Venkatesh Reddy *et al.*, 2024).

El carbón activado es el adsorbente más utilizado para el tratamiento de aguas residuales. Es un material de color negro, altamente poroso y con una gran superficie interna que permite retener moléculas contaminantes. Se obtiene a partir de la pirólisis de materiales ricos en carbono, como madera o cáscara de coco, y la activación mediante procesos físicos o químicos. En función de su tamaño de partícula, puede presentarse como carbón activado en polvo (PAC, del inglés *powdered activated carbon*) o granular (GAC, del inglés *granular activated carbon*). La **Figura 4** muestra el estado físico de ambos tipos, siendo el primer recipiente PAC, y el segundo carbón activado GAC.

El PAC tiene partículas muy pequeñas (5-50 micras (μm)) y es utilizado generalmente en reactores agitados. Al tener un tamaño de partícula pequeño, su superficie específica es mayor, lo que facilita una adsorción rápida, aunque se satura antes. El GAC, en cambio, presenta un tamaño de 0,2 – 5 milímetros (mm) y se utiliza en columnas de lecho fijo donde el agua circula de forma continua, permitiendo un tratamiento más duradero y una regeneración posterior del material. Ambos se aplican principalmente en la etapa final de las plantas depuradoras de aguas residuales, como tratamientos avanzados, cuando el agua ya ha pasado por las etapas de tratamientos fisicoquímicos y biológicos.

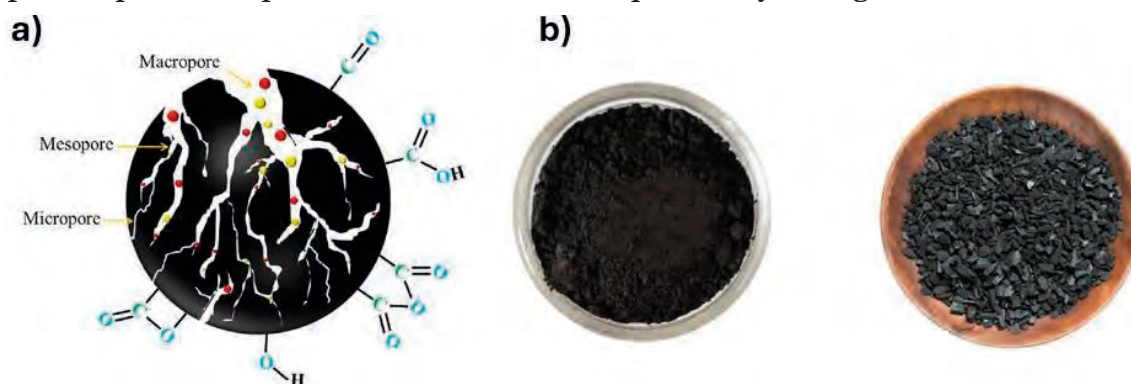


Figura 4. (a) Presentación esquemática de la estructura de los poros y los grupos funcionales de la superficie de carbón activado (Sultana *et al.*, 2022); y (b) Carbón Activado en Polvo (PAC) y Carbón Activado Granular (GAC) (Carbotecnia, 2023).

Durante la adsorción, las moléculas de PFAS se adhieren a la superficie del carbón gracias a interacciones físicas y electrostáticas. La eficacia del carbón activado en la eliminación de PFAS del agua depende de diversos factores: el tipo de carbón y su porosidad, la temperatura, el pH del agua, la dosis empleada y el tiempo de contacto. Por ejemplo, un pH bajo (<5) o alto ($>8,5$) puede reducir la eficiencia del proceso, mientras que un caudal de agua demasiado alto disminuye el tiempo de contacto y, por tanto, la eliminación de contaminantes es insuficiente por limitaciones cinéticas.

Aunque el carbón activado es una herramienta eficaz, su principal limitación es la saturación: una vez que los poros se llenan, pierde eficacia. La ventaja es que el carbón activado, puede regenerarse mediante tratamientos térmicos que eliminan los compuestos adsorbidos, lo que permite reutilizarlo y reducir residuos. En el caso del GAC, como se usa en lecho fijo, su recuperación es sencilla, lo que facilita la implementación de tratamientos de regeneración y uso posterior. Sin embargo, en el caso del PAC, debido a su pequeño tamaño de partícula, no es fácil de separar del agua después de su saturación. Por ese motivo, es menos común llevar a cabo su regeneración y, generalmente, se usa una sola vez y debe eliminarse junto con los lodos generados.

Conclusión

Los PFAS representan uno de los desafíos ambientales más complejos de nuestro tiempo. Su estabilidad química, su capacidad de acumularse en los organismos y su presencia global convierten su presencia ambiental en un problema de difícil solución. Están en el agua que bebemos, en los alimentos que consumimos y en los objetos que usamos a diario.

Aunque se ha avanzado en su regulación y en la conciencia pública sobre sus riesgos, la realidad es que su eliminación completa sigue siendo un reto. Las tecnologías de tratamiento actuales, como la adsorción con carbón activado, ofrecen soluciones parciales, pero bastante eficaces, para reducir su concentración en el agua. No obstante, es fundamental seguir investigando, desarrollar materiales más sostenibles y, sobre todo, promover políticas que garanticen el fin de la producción y uso de estas sustancias.

Bibliografía

- Abunada, Z., Alazaiza, M. Y. D. y Bashir, M. J. K. (2020). An Overview of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Environment: Source, Fate, Risk and Regulations. *Water*, 12(12), pp.3590. doi:10.3390/W12123590.
- Adewuyi, A. y Li, Q. (2024). Emergency of per- and polyfluoroalkyl substances in drinking water: Status, regulation, and mitigation strategies in developing countries. *Eco-Environment & Health*, 3(3), pp. 355-368. doi:10.1016/J.EEHL.2024.05.008.

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2021). *Toxicological Profile for Perfluoroalkyls*. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK592138/> (Accedido: 16 de junio de 2025).
- Barry, V., Winquist, A. y Steenland, K. (2013). Perfluorooctanoic acid (PFOA) exposures and incident cancers among adults living near a chemical plant. *Environmental Health Perspectives*, 121(11-12), pp. 1313-1318. doi:10.1289/EHP.1306615.
- Bayode, A. A., Emmanuel, S. S., Akinyemi, A. O., Ore, O. T., Akpotu, S. O., Koko, D. T., Momodu, D. E. y López-Maldonado, E. A. (2024). Innovative techniques for combating a common enemy forever chemicals: A comprehensive approach to mitigating per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) contamination. *Environmental Research*, 261, p. 119719. doi:10.1016/J.ENVRES.2024.119719.
- Billmeyer, F. W. (2020). *Ciencia de los polímeros*. 2.^a ed. Barcelona: Editorial Reverté. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=FeoFEAAAQBAJ> (Accedido: 23 de mayo de 2025).
- Boletín Oficial del Estado (2023). BOE-A-2023-628 Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. *Boletín Oficial del Estado*, Número 9, pp. 4253– 4354. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2023-628> (Accedido: 17 de junio de 2025).
- Carbotecnía (2023). *Para el carbón activado ¿Qué rango de tamaño de partícula es el más adecuado para cada aplicación?* Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/tamano-particula/> (Accedido: 29 de junio de 2025).
- Dargaville, B. L. y Hutmacher, D. W. (2022). Water as the often neglected medium at the interface between materials and biology. *Nature Communications*, 13(1), pp. 1–10. doi:10.1038/s41467-022-31889-x.
- deLuca, N. M., Minucci, J. M., Mullikin, A., Slover, R. y Cohen Hubal, E. A. (2022). Human exposure pathways to poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from indoor media: A systematic review. *Environment International*, 162, p. 107149. doi:10.1016/J.ENVINT.2022.107149.
- Desotec (2023). *Una solución sostenible para eliminar para siempre los «químicos permanentes» de las aguas residuales y las emisiones al aire*. Disponible en: <https://www.desotec.com/es/knowledge-hub/article/sustainable-solution-to-remove-forever-chemicals-from-wastewater-air-emissions-for-good> (Accedido: 27 de junio de 2025).
- Dhore, R. y Murthy, G. S. (2021). Per/polyfluoroalkyl substances production, applications and environmental impacts. *Bioresource Technology*, 341, p. 125808. doi:10.1016/J.BIORTECH.2021.125808.
- Dickman, R. A. y Aga, D. S. (2022). A review of recent studies on toxicity, sequestration, and degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Journal of Hazardous Materials*, 436, p. 129120 doi:10.1016/J.JHAZMAT.2022.129120.

- European Environment Agency (2023). *¿Qué son las PFAS y por qué son perjudiciales para mi salud?* Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/es/help/preguntas-frecuentes/que-son-las-pfas-y> (Accedido: 29 de junio de 2025).
- Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I. T., DeWitt, J. C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C. A., Trier, X. y Wang, Z. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(12), pp. 2345–2373. doi:10.1039/DoEM00291G.
- Hussain, H. N., Jilani, M. I., Imtiaz, F., Ahmed, T., Arshad, M. B., Mudassar, M. y Sharif, M. N. (2025). Advances in the removal of Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) from water using destructive and non-destructive methods. *Green Analytical Chemistry*, 12, p. 100225. doi:10.1016/J.GREEAC.2025.100225.
- Indalo (2023) *PFAS y el ciclo del agua*. Disponible en: <https://indalowater.com/pfas-y-el-ciclo-del-agua/> (Accedido: 18 de octubre de 2025).
- Jedra, C. (2023) *Forever Chemicals Have Been Found In Hawaii's Environment. Now What?* Disponible en: <https://www.civilbeat.org/2023/03/forever-chemicals-have-been-found-in-hawaiis-environment-now-what/> (Accedido: 19 de junio de 2025).
- Macheka-Tendenguwo, L. R., Olowoyo, J. O., Mugivhisa, L. L. y Abafe, O. A. (2018). Per- and polyfluoroalkyl substances in human breast milk and current analytical methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(36), pp. 36064–36086. doi:10.1007/S11356-018-3483-Z.
- Navarro Martín, I. (2018). *Sustancias perfluoradas: PFSA, PFCA, FOSA, N-MeFOSA y N-EtFOSA. Desarrollo de metodologías analíticas y aplicación a muestras ambientales*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Disponible en: <https://docta.ucm.es/entities/publication/31b618fd-72af-4a48-a46b-099d728b972a> (Accedido: 25 de mayo de 2025).
- Panieri, E., Baralic, K., Djukic-Cosic, D., Buha Djordjevic, A. y Saso, L. (2022). PFAS Molecules: A Major Concern for the Human Health and the Environment. *Toxics*, 10(2), p. 44. doi:10.3390/TOXICS10020044.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2000). Directiva 2000/60/CE.... *Diario Oficial de la Unión Europea*, N.º 327, pp. 1–73. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524> (Accedido: 17 de junio de 2025).
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2020). Directiva (UE) 2020/2184 *Diario Oficial de la Unión Europea*, N.º 435, pp. 1–62. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2020-81947> (Accedido: 17 de junio de 2025).
- Perera, D. C. y Meegoda, J. N. (2024). PFAS: The Journey from Wonder Chemicals to Environmental Nightmares and the Search for Solutions. *Applied Sciences*, 14(19), p. 8611. doi:10.3390/APP14198611.

- PFAS Facts (2019) *The Facts on PFAS*. Disponible en: <https://www.pfasfacts.com/> (Accedido: 21 de mayo de 2025).
- Qi, Q., Niture, S., Gadi, S., Arthur, E., Moore, J., Levine, K. E. y Kumar, D. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances activate UPR pathway, induce steatosis and fibrosis in liver cells. *Environmental Toxicology*, 38(1), p. 225. doi:10.1002/TOX.23680.
- Rodriguez-Jorquera, I. A., Kroll, K. J., Toor, G. S. y Denslow, N. D. (2015). Transcriptional and physiological response of fathead minnows (*Pimephales promelas*) exposed to urban waters entering into wildlife protected areas. *Environmental Pollution*, 199, pp. 155–165. doi:10.1016/J.ENVPOL.2015.01.021.
- Söregård, M., Bergström, S., McCleaf, P., Wiberg, K. y Ahrens, L. (2022). Long- distance transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a Swedish drinking water aquifer. *Environmental Pollution*, 311, p. 119981. doi:10.1016/J.ENVPOL.2022.119981.
- Sultana, M., Rownok, M. H., Sabrin, M., Rahaman, M. H. y Alam, S. N. (2022). A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner Engineering and Technology*, 6. doi:10.1016/J.CLET.2021.100382.
- Reddy, C. V., Kumar, R., Chakraborty, P., Karmakar, B., Pottipati, S., Kundu, A. y Jeon, B. H. (2024). A critical science mapping approach on removal mechanism and pathways of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) in water and wastewater: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 492, p. 152272. doi:10.1016/J.CEJ.2024.152272.
- Wang, C., Magnuson, J. T., Zheng, C. y Qiu, W. (2025). Incidence of pollution, bioaccumulation, biomagnification, and toxic effects of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in aquatic ecosystems: A review. *Aquatic Toxicology*, 286, p. 107469. doi:10.1016/J.AQUATOX.2025.107469.

SIGUIENDO LA PISTA

Cartografía digital de las propiedades edáficas superficiales en el área de Riello, noroeste de León.

Carmen Vega Valdés¹, Montserrat Ferrer Julià², Sara Alcalde Aparicio³

¹Graduada en Ciencias Ambientales (Curso 2017-2025)

²Tutora del Área de Geodinámica Externa, Departamento de Geografía y Geología

³Cotutora del Área de Edafología, Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias

Resumen

Ante la escasa disponibilidad de datos edáficos y su creciente demanda, ha surgido la Cartografía Digital de Suelos (*Digital Soil Mapping*, DSM), con la finalidad de generar mapas continuos de variables edafológicas. El presente trabajo tiene como objetivo elaborar una cartografía de las propiedades edáficas superficiales –arcilla, arena, limo y materia orgánica– en la zona de Riello (León), mediante la aplicación del método DSM basado en el modelo *scorpan*. Para su desarrollo, se utilizaron datos edáficos procedentes de muestreos y perfiles, así como covariables ambientales representativas de los factores formadores del suelo. Con estos datos se realizó un análisis estadístico mediante regresión lineal múltiple (MLR), siguiendo un proceso de calibración y validación, obteniéndose el mejor modelo predictivo para cada variable, junto con sus residuos y error asociado.

Los resultados muestran que la materia orgánica es la variable con mejor ajuste al modelo ($R^2 > 0,50$), mientras que el limo presenta el valor más bajo ($R^2 = 0,37$). En consonancia, el error cuadrático medio (RMSE) más bajo corresponde a la materia orgánica (2,06), y el más alto al limo (9,70). Finalmente, se ha concluido que, a pesar de sus limitaciones, la aplicación del modelo *scorpan* en la cartografía digital de suelos constituye una herramienta valiosa en áreas de estudio con pocos datos de suelos.

Palabras clave

Cartografía Digital de Suelos, covariables ambientales, factores formadores del suelo, geoestadística, modelo *scorpan*, regresión lineal múltiple.

Introducción y objetivos

Históricamente los estudios edafológicos se centraron en la identificación, clasificación e inventario de los suelos. No obstante, en las últimas décadas, han evolucionado hacia un enfoque centrado en el medioambiente, que entiende que el suelo es una parte integral del ecosistema, que interactúa con los factores

ambientales, derivando en patrones complejos y procesos de coevolución a lo largo del tiempo (Jenny, 1994; Hartemink *et al.*, 2001; Grunwald, 2009). Este cambio ha derivado en un aumento de la demanda de (i) datos del suelo e (ii) información que permita monitorizar y modelizar las variables edáficas y ambientales (Grunwald *et al.*, 2011; Belkadi y Drias, 2023).

Como respuesta a dicho aumento y dada la limitada disponibilidad de datos edáficos, ha surgido la Cartografía Digital de Suelos, “*Digital Soil Mapping*” (DSM).

Este tipo de cartografía genera mapas digitales de propiedades y clases de suelos, así como bases de datos del suelo geográficamente referenciadas con una resolución definida, mediante sistemas empíricos de inferencia que relacionan observaciones puntuales del suelo con variables ambientales espacialmente referenciadas, (McBratney *et al.*, 2003; Lagacherie y McBratney, 2006; Carré *et al.*, 2007; Ma *et al.*, 2019).

Entre las ventajas que presenta el método seguido en DSM frente a la cartografía tradicional de los suelos destacan el menor coste, la consistencia de los datos, la actualización sencilla y la estimación de las incertidumbres (Carré *et al.*, 2007; Alemán-Montes *et al.*, 2019).

El objetivo principal de este trabajo es la realización de un mapa digital de las propiedades del suelo, concretamente de los porcentajes de arcilla, arena, limo y materia orgánica, en la zona de Riello, en la provincia de León, mediante la aplicación del método *Digital Soil Mapping*, basado en el modelo *scorpan*.

Área de estudio

El área de estudio se corresponde con la hoja 128 (Riello) del Mapa Topográfico Nacional, en la provincia de León (**Fig. 1**). Esta área abarca principalmente las comarcas de Omaña y Cepeda, con altitudes entre los 900 y 1.834 m.s.n.m. La mayor parte del territorio pertenece a la cuenca hidrográfica del Duero, siendo el río principal el Omaña. Destaca su rica biodiversidad y su alta variedad florística, faunística y paisajística (Junta de Castilla y León, sin fecha; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024).

La temperatura media anual de la zona es de 9,2 °C, con una precipitación media anual de 874,5 mm y una evapotranspiración potencial (ETP) media anual de 610,9 mm, (León Llamazares *et al.*, 1991). Siguiendo la clasificación climática de Köppen se puede determinar que la zona de estudio se corresponde con un clima mediterráneo de veranos frescos, caracterizado por temperaturas bajas (Chazarra Bernabé *et al.*, 2018). Respecto a la litología, la zona de estudio está conformada principalmente por dos grupos de materiales correspondientes con el Precámbrico y el Paleozoico, repartidos respectivamente, en la zona norte y sur de la hoja, con afloramientos de materiales del Carbonífero y Cretácico (Martín Parra *et al.*, 1989; Alonso Herrero *et al.*, 2010).

A nivel geomorfológico, predominan las formas montañosas al corresponderse en su mayoría a la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica, presentando un relieve de tipo apalachense (Martín Parra *et al.*, 1989; Alonso Herrero *et al.*, 2010).

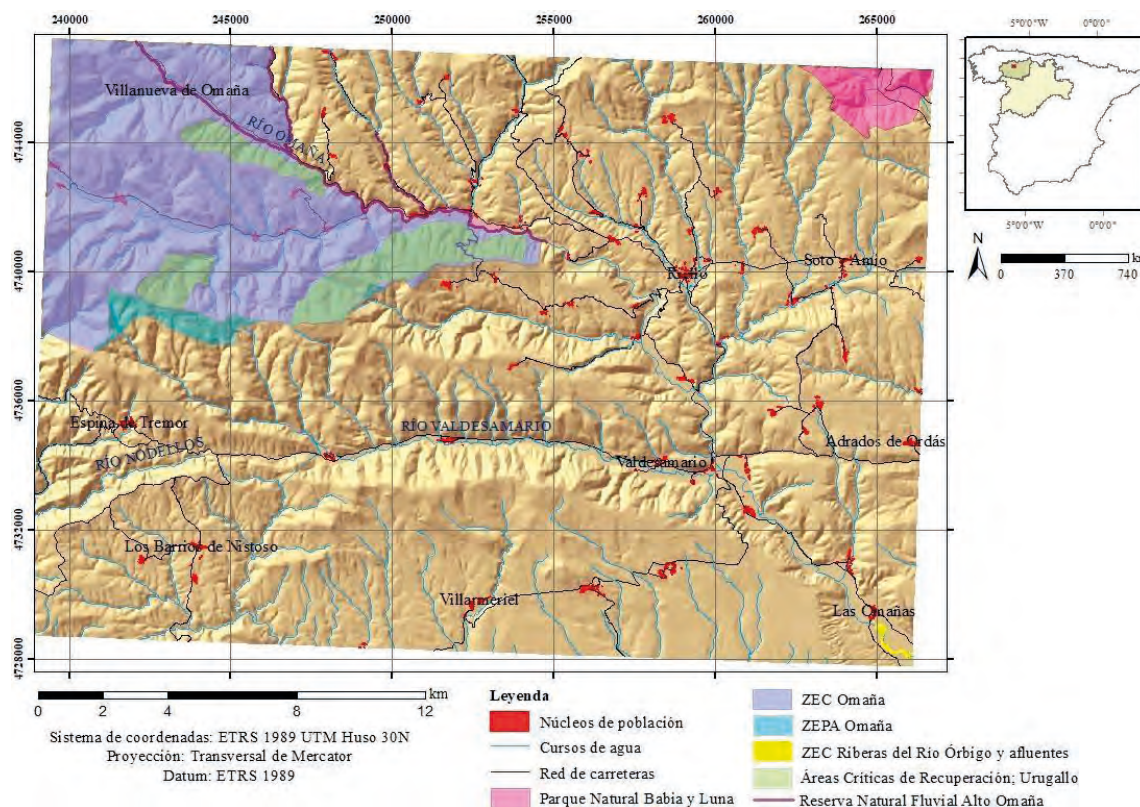


Figura 1. Localización y figuras de protección.

Edafológicamente, los suelos que cubren la superficie de la hoja 128, siguiendo la clasificación de la FAO (1998), son en su mayoría asociaciones de Cambisol dístrico / Regosol dístrico, desarrollados sobre areniscas, pizarras y cuarcitas del Precámbrico y Paleozoico. En menor medida, predominan las asociaciones de Leptosol úmbrico / Regosol léptico, con inclusiones de Cambisol eútrico desarrolladas principalmente sobre pizarras y areniscas del Precámbrico y Paleozoico (Martín Parra *et al.*, 1989; Alonso Herrero *et al.*, 2010).

En cuanto a los usos del suelo y la vegetación, predomina el uso forestal, que ocupa el 94 % de la superficie del área de estudio. Dentro del uso forestal se incluye la superficie cubierta por matorrales, la cual ocupa en torno al 41 % de superficie total de estudio, seguida por las masas de frondosas, coníferas y mixtas (36 %) y los prados y pastizales (17 %) (Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), sin fecha; Alonso Herrero *et al.*, 2010)

Material y métodos

Modelo scorpan

La metodología aplicada en este trabajo para la realización de la cartografía digital del suelo se fundamenta en el modelo *scorpan*. Este modelo proporciona descripciones cuantitativas y empíricas de las relaciones entre el suelo y otros factores referenciados espacialmente, con la finalidad de establecer funciones de predicción de las propiedades edáficas. Se basa en la siguiente ecuación (Ec. 1), que posibilita la predicción de las clases del suelo (S_c) o de sus atributos (S_a) (McBratney *et al.*, 2003; Minasny y McBratney, 2016).

$$S_c = f(s, c, o, r, p, a, n) + \varepsilon \quad o \quad S_a = f(s, c, o, r, p, a, n) + \varepsilon \quad [\text{Ec. 1}]$$

Los siete factores formadores del suelo, también denominados variables ambientales, que definen esta función son: el suelo (s), el clima (c), los organismos (o), la topografía (r), el material parental (p), la edad (a) y la posición espacial (n). Se ha de destacar que este modelo incluye el suelo como un factor formador, debido a que puede predecirse a partir de sus clases y propiedades medidas en campo. Igualmente, esta ecuación incluye un término de error (ε), que representa las desviaciones del modelo con respecto al valor observado (McBratney *et al.*, 2003; Belkadi y Drias, 2023). La elección de los factores utilizados en el modelo *scorpan* es una cuestión de conveniencia, determinada por la zona de estudio, y la disponibilidad y acceso a las fuentes de datos. Cada uno de estos factores se define mediante un conjunto de covariables ambientales continuas o categóricas, que deben acondicionarse individualmente para la aplicación del modelo en el área de estudio definida (McBratney *et al.*, 2003).

Para la aplicación del modelo se requieren dos tipos de datos de entrada georreferenciados: los datos correspondientes a las clases del suelo (S_c) o a sus atributos (S_a), que serán objeto de estudio, provenientes de métodos de observación de campo y de laboratorio; y los datos correspondientes a las covariables ambientales seleccionadas, con información para la totalidad del área de estudio (Lagacherie y McBratney, 2006; Minasny y McBratney, 2016).

Una vez que se dispone de todos los datos se lleva a cabo una regresión lineal múltiple (RLM), que permite modelizar la relación entre la variable dependiente, el atributo del suelo analizado, y el conjunto de las variables independientes, las covariables ambientales seleccionadas. Para homogeneizar la información, se consideraron únicamente los horizontes A de los perfiles, aplicando una media ponderada cuando existían varios horizontes en un mismo perfil.

Respecto a los factores formadores del suelo, en este trabajo se han seleccionado: la topografía (r), el clima (c), la vegetación (o) y el material parental (p). Se ha omitido la posición espacial (n) al estar definida en los perfiles del suelo e

implícita en todas las covariables ambientales que constituyen los factores seleccionados. Asimismo, no se ha considerado el factor tiempo (a) debido a la falta de cartografía y su elevado error asociado. Recaltar que el suelo (s) se ha usado solo como variable dependiente, sin considerarse como un factor formador.

Materiales

La información de las variables dependientes objeto de estudio proviene de un total de 52 puntos con datos del suelo localizados dentro del área de estudio (**Fig. 2**), los cuales proceden de dos fuentes de datos: 32 provienen de la Base de Datos de los Suelos de Castilla y León (Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León) —incluyendo datos del INES, proyecto LUCAS y la Diputación de León—, y 20 perfiles edáficos corresponden al Plan Piloto del Mapa de Suelos de la provincia de León, desarrollado por el Instituto de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Biodiversidad de la Universidad de León (Alonso Herrero *et al.*, 2010; ITACyL, 2012).

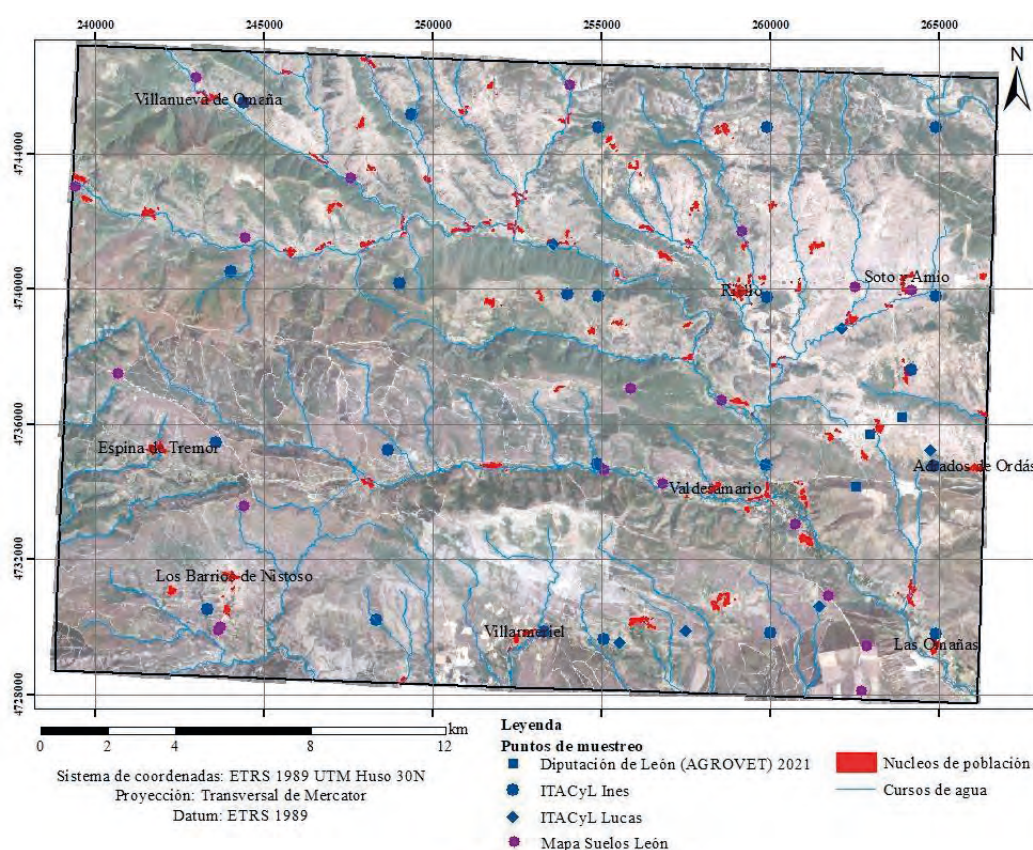


Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo utilizados.

Las covariables ambientales se obtuvieron de distintas capas temáticas y recursos disponibles, los cuales fueron estimados y adaptados a la zona de estu-

dio mediante el uso de un sistema de información geográfica (SIG), concretamente el software ArcGIS Desktop 10.7.

Las covariables ambientales correspondientes al factor topografía se estimaron a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) de la hoja 128, complementado por los MDT de las hojas colindantes para cubrir la cuenca hidrográfica (Instituto Geográfico Nacional, 2020).

Respecto a los datos pertinentes al clima, estos se obtuvieron del modelo SIMPA (Sistema Integrado de Modelación Precipitación-Aportación). Para el desempeño de este trabajo, se utilizaron los datos de temperatura media anual (°C), precipitación media anual (mm) y evapotranspiración potencial media anual (mm) obtenidos a partir de los mapas promedio anuales para la serie larga de este modelo, la cual recopila todos los datos desde el año 1940 al 2017 (Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, sin fecha).

En cuanto a los usos del suelo, estos se obtuvieron a partir de la cartografía del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE) del año 2014 (escala 1:25000), en combinación con información de la cartografía del programa CORINE Land Cover del año 2012 a escala 1:100.000, ambas disponibles gratuitamente en el CNIG. De igual manera, con la finalidad de analizar las coberturas y usos del suelo, también se descargaron imágenes del satélite Sentinel-2 L2A correspondientes al año 2017 (resolución espacial de 10m), seleccionándose una para cada mes (Copernicus EU, 2025). Se seleccionó este año por ser el más reciente que presenta valores climatológicos medios similares a los valores medios registrados durante la serie climática del modelo SIMPA.

Finalmente, la información relativa a la litología del área de estudio se obtuvo a partir del mapa geológico continuo GEODE (escala 1:50000), correspondiente a la hoja 128 (González Menéndez *et al.*, 2008).

Análisis de los factores formadores del suelo y obtención de las covariables

Para poder implementar el método *scorpan* y analizar las variables edáficas (% arcilla, % arena, % limo y % materia orgánica) ha sido necesario seleccionar y calcular las covariables ambientales. Posteriormente, se extrajeron sus valores en cada uno de los puntos con información edáfica, mediante análisis espaciales de superposición con SIG, obteniéndose así la totalidad de los datos georreferenciados que serán utilizados en la aplicación del modelo.

Topografía

Las covariables ambientales que se han utilizado, referentes a la topografía, son la altitud, la pendiente, el índice topográfico de humedad (TWI) y la orientación.

La orientación se transformó en una variable lineal y aplicable al modelo *scorpan*, mediante el Índice de Carga Térmica (*Heat Load Index*), que permite

determinar la orientación en base al número de horas de sol que recibe la superficie (McCune y Keon, 2002).

Clima

Las covariables temperatura media anual (°C), precipitación media anual (mm), y evapotranspiración potencial media anual (mm) se obtuvieron a partir del modelo SIMPA.

La radiación solar (kWH/m² año) se calculó para el año 2017, mediante la aplicación del modelo de radiación difusa uniforme, a través de intervalos mensuales (Fu y Rich, 2002).

Vegetación

Las covariables ambientales referentes a la vegetación que se han utilizado son los usos del suelo y los estadísticos derivados de los NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Los usos del suelo se reclasificaron en cinco categorías principales (arbolado; matorral; pastizal; agrícola; otros). Posteriormente, cada categoría se transformó en una capa ráster binaria (valor 1 = categoría presente; 0 = ausente).

El NDVI se calculó para cada uno de los meses, usando las imágenes de la banda 4, correspondiente a la longitud de onda del rojo y la banda 8, correspondiente a la longitud de onda del infrarrojo cercano (NIR). Se ha de resaltar que el cálculo del NDVI se ejecutó diferenciando dos épocas, una época lluviosa (enero a mayo) y otra seca (junio a septiembre), obteniéndose para cada una los valores estadísticos de media, mínimo y máximo.

Material parental

La covariable ambiental de este factor es la litología (**Fig. 3**). Con la finalidad de reducir su número de clases, se llevó a cabo una reclasificación del mapa, siguiendo la clasificación propuesta por Alonso Herrero (1995), basada principalmente en el grado de consolidación, la naturaleza y la textura del material parental. Mediante la aplicación de estos criterios y su simplificación, se fijaron seis clases litológicas (litología poco consolidada; litología consolidada calcárea y mixta; litología consolidada silíceo de grano fino y alteración con aportes finos y gruesos; litología consolidada silíceo de grano grueso y alteración con aportes finos y gruesos; otros).

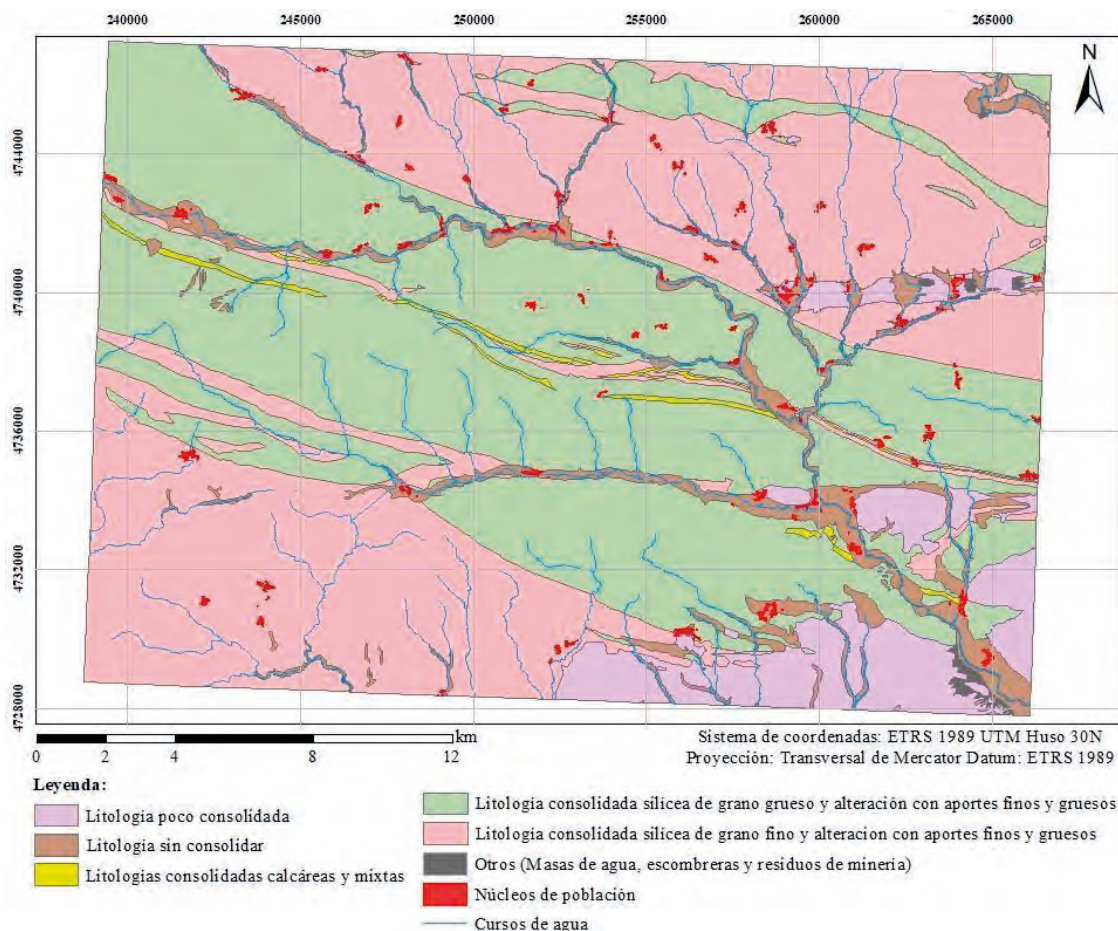


Figura 3. Reclasificación de las unidades litológicas.

Análisis estadístico

Debido al elevado número de covariables, se aplicó un análisis de correlaciones, mediante el coeficiente de Pearson, sobre los NDVI obtenidos, seleccionando aquellos con menor redundancia ($r > 0,65$ se consideró alta correlación).

El análisis estadístico se realizó mediante el *software* SPSS *Statistics* y consistió en un proceso de calibración mediante regresión lineal múltiple (MLR) con el método de “eliminación hacia atrás”, empleando todos los puntos, y una validación cruzada (*cross-validation*) con 10 grupos, constituidos por puntos seleccionados aleatoriamente. Al excluirse un número reducido de los datos en cada iteración, las ecuaciones de validación obtenidas no difieren significativamente respecto a las generadas durante el proceso de calibración, respaldándose así la consistencia del modelo y validando su aplicabilidad (Kohavi, 1995). Los modelos seleccionados fueron aquellos estadísticamente significativos ($p \leq 0,05$) y con mayor coeficiente de determinación (R^2).

Finalmente, se estimaron los valores de calibración y validación para cada punto de muestreo y se evaluó la calidad de los modelos mediante el cálculo y análisis de sus residuos y su error cuadrático medio (RMSE).

Análisis con Sistema de Información Geográfica (SIG)

Una vez determinadas las ecuaciones de calibración para cada uno de los atributos del suelo (porcentaje de arcilla, arena, limo y materia orgánica), se procedió a aplicarlas, obteniéndose así sus valores estimados para la totalidad del área de estudio. Para completar la aplicación del modelo *scorpan*, falta estimar el error (ϵ). Para ello, se interpolaron los valores puntuales de los residuos siguiendo el método de la distancia inversa ponderada (IDW). De este modo se obtuvieron los valores de los residuos de cada una de las variables dependientes, para la totalidad del área de estudio.

Finalmente, se sumaron el ráster que contenía los valores estimados de cada variable dependiente y el ráster de sus residuos interpolados. Como resultado final, se obtuvieron los cuatro mapas finales con los valores porcentuales de arcilla, arena, limo y materia orgánica de los suelos de la hoja 128.

Resultados

Resultados del análisis estadístico

El análisis de correlación con coeficiente de Pearson realizado entre las covariables derivadas del NDVI, ha permitido determinar los NDVI óptimos para la aplicación del modelo *scorpan*. Las covariables elegidas fueron, el NDVI medio de la época seca y el NDVI medio y mínimo de la época húmeda.

A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico correspondientes al proceso de calibración para cada una de las variables dependientes estimadas. En el caso de la **arcilla** el modelo seleccionado mostró un valor de diferencia significativa (p) de 0,002, un coeficiente de determinación (R^2) de 0,489 y un error cuadrático medio (RMSE) de 4,75. Para la **arena**, el modelo presentó un p de 0,02, un R^2 de 0,376 y un RMSE de 9,49, mientras que en el caso del **limo** el modelo mostró un p de 0,038, un R^2 de 0,372 y un RMSE de 9,66. Finalmente, para la **materia orgánica** el modelo seleccionado presentó un valor de p de 0,00, un R^2 de 0,630 y un RMSE de 2,055.

Resultados del análisis geoestadístico

Como resultado final del análisis geoestadístico, se obtuvieron los cuatro mapas objetivo de este estudio, consiguiéndose así las estimaciones porcentuales de los contenidos de arcilla, arena, limo y materia orgánica para la totalidad de la hoja 128. Estos mapas, que integran tanto los valores calibrados como los residuos interpolados, permiten observar la influencia que tienen las distintas covariables ambientales sobre sus valores, principalmente la litología y los usos

del suelo. En la **Figura 4** se muestra, a modo de ejemplo, el resultado obtenido para el contenido de arcilla.

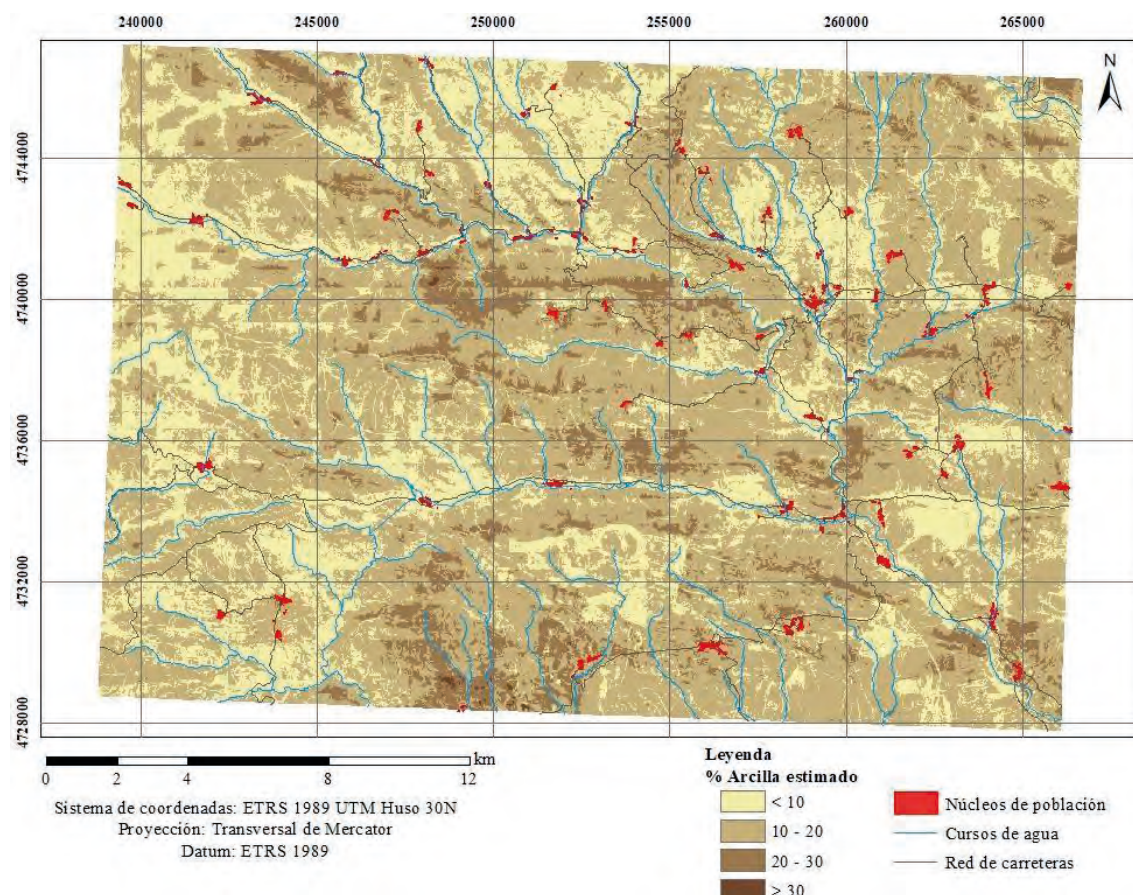


Figura 4. Resultado obtenido para el contenido de arcilla (%).

Discusión

Al evaluar los resultados obtenidos a través de los valores del coeficiente de determinación (R^2) y del error cuadrático medio (RMSE), se observa que estos muestran ciertas mejoras respecto a otros estudios (Hengl *et al.*, 2004; Mosleh *et al.*, 2016; Rodríguez Fernández, 2021; Rodríguez-Fernández *et al.*, 2022).

A pesar de finalmente haber obtenido unos resultados adecuados, dentro del rango de valores esperados, es fundamental considerar que tanto la selección de las covariables empleadas como la elevada heterogeneidad espacial del suelo pueden introducir errores en la estimación de las propiedades edáficas superficiales (McBratney *et al.*, 2003). Asimismo, al corresponderse las covariables ambientales con mayor peso y, por tanto, más determinantes en la estimación de los modelos, con la litología, la cubierta vegetal, los usos del suelo y el relieve, se evidencia una dependencia con las características específicas del área modelizada, lo que podría limitar la aplicabilidad de los modelos a otras regiones.

En cuanto a la metodología, cabe destacar que la aplicación de la validación cruzada estratificada permitió un uso más eficiente de los datos, al emplear cada grupo tanto en la fase de entrenamiento como en la de evaluación. Esta técnica ha mostrado ser una alternativa adecuada para estudios con un número reducido de puntos de muestreo, coincidiendo con trabajos previos (Kohavi, 1995; Grunwald, 2009).

Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La aplicación de la cartografía digital de propiedades edáficas superficiales basada en el modelo *scorpan*, a pesar de sus limitaciones, supone una herramienta útil para generar mapas de suelos en áreas carentes de cartografía, además de facilitar la creación de mapas dinámicos con posibilidad de actualización continua.
- La validación cruzada se presenta como la metodología más adecuada para llevar a cabo el análisis estadístico de validación, cuando se dispone de un número limitado de observaciones.
- La dependencia de los modelos respecto características específicas del área modelizada puede limitar su aplicabilidad a otras regiones.
- El éxito del DSM depende directamente de la disponibilidad, representatividad y calidad de los puntos de muestreo, por lo que el muestreo convencional de los suelos es aún un elemento clave en esta metodología. De igual manera, la disponibilidad, fiabilidad y resolución de las covariables ambientales empleadas determina la eficacia de los modelos predictivos.

Bibliografía

- Alemán-Montes, B., Búcaro-González, A., Henríquez-Henríquez, C. y Largaespada-Zelaya, K. 2019. Mapeo digital de suelos agrícolas en la región occidental del Valle Central de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 43(2): 157-166.
- Alonso Herrero, E. 1995. Litología y Geomorfología. En Atlas del Medio Natural de la provincia de León (eds. Gallego Valcarce, A., Alonso Herrero, E. y Penas Merino, A.), 11-18, Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE), Madrid, España.
- Alonso Herrero, E., Vidal Bardán, M., Villa Bermejo, J. E., Fuertes Gutiérrez, I., Alcalde Aparicio, S., Robles Llamazares, J. Á., Rodríguez Blanco, J. y Juan González, L. A. 2010. Plan Piloto del Mapa de Suelos de la Provincia de León. Escala 1:50.000. Hoja 128 (Riello). Universidad de León, León, España.
- Belkadi, W. H. y Drias, Y. 2023. Advancements in Digital Soil Mapping: From Data Acquisition to Uncertainty Estimation - A Comprehensive Review. En Artificial In-

- telligence Doctoral Symposium. Communications in Computer and Information Science (eds. Drias, H., Yalaoui, F. y Hadjali, A.), 162 – 177, Springer, Singapur, Singapur.
- Carré, F., McBratney, A. B., Mayr, T. y Montanarella, L. 2007. Digital soil assessments: Beyond DSM. *Geoderma*, 142(1-2): 69-79. doi:10.1016/j.geoderma.2007.08.015.
- Chazarra Bernabé, A., Flórez García, E., Peraza Sánchez, B., Tohá Rebull, T., Lorenzo Mariño, B., Criado Pinto, E., Moreno García, J. V., Romero Fresneda, R. y Botey Fullat, R. 2018. Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2016). Informe del Ministerio para la Transición Ecológica y Agencia Estatal de Meteorología. doi:10.31978/014-18-004-2.
- Fu, P. y Rich, P.M. 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37: 25–35.
- Grunwald, S. 2009. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. *Geoderma*, 152(3-4): 195-207. doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.003.
- Grunwald, S., Thompson, J. A. y Boettinger, J. L. 2011. Digital Soil Mapping and Modeling at Continental Scales: Finding Solutions for Global Issues. *Soil Science Society of America Journal*, 75(4): 1201-1213. doi:10.2136/sssaj2011.0025.
- Hartemink, A. E., Mcbratney, A. B. y Cattle, J. A. 2001. Developments and trends in soil science: 100 volumes of *Geoderma* (1967–2001). *Geoderma*, 100: 217-268.
- Hengl, T., Heuvelink, G. B. M. y Stein, A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 20(1-2): 75-93. doi:10.1016/j.geoderma.2003.08.018.
- Jenny, H. 1994. Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. McGraw-Hill, Nueva York, Estados Unidos de América.
- Kohavi, R. 1995. A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. International joint conference on artificial intelligence.
- Lagacherie, P. y McBratney, A. B. 2006. Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. *Developments in Soil Science*, 31: 3-22. doi:10.1016/S0166-2481(06)31001-X
- León Llamazares, A., Arriba Balenciaga, A. y Plaza, M. del C. 1991. Caracterización agroclimática de la provincia de León. Informe del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- Ma, Y., Minasny, B., Malone, B. P. y Mcbratney, A. B. 2019. Pedology and digital soil mapping (DSM). *European Journal of Soil Science*, 70(2):216-235. doi:10.1111/ejss.12790.
- Martín Parra, L. M., Enrile Albir, A., González Lastra, J., Maymo Asses, A. y Bardají, M. T. 1989. Mapa Geológico de España. Riello. Informe del Instituto Tecnológico Geominero de España.

- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L. y Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2): 3-52. doi:10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
- Minasny, B. y McBratney, A. B. 2016. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, 264: 301-311. doi:10.1016/j.geoderma.2015.07.017.
- Mosleh, Z., Salehi, M. H., Jafari, A., Borujeni, I. E. y Mehnatkesh, A. 2016. The effectiveness of digital soil mapping to predict soil properties over low-relief areas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(3): 1 - 13. doi:10.1007/s10661-016-5204-8.
- Rodríguez Fernández, J. 2021. Cartografía digital de propiedades edáficas en el área de Benavides de Órbigo (León). Trabajo de fin de grado, Universidad de León, España.
- Rodríguez-Fernández, J., Ferrer-Juliá, M. y Alcalde-Aparicio, S. 2022. Cartografía digital de propiedades edáficas superficiales en las zonas agrícolas de El Órbigo y La Cepeda (León, NO España). *Revista de Ciencias Agrárias*, 2022(4): 225-229. doi:10.19084/rca.28410.

Webgrafía

- <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/home> (Accedido: 12 de septiembre de 2023).
- <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geode.aspx> (Accedido: 5 de agosto de 2023).
- <https://medioambiente.jcyl.es/web/es/medio-natural/espacios-naturales.html> (Accedido: 8 de junio 2025).
- <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-products> (Accedido: 5 de junio de 2025).
- https://suelos.itacyl.es/base_datos (Accedido: 12 de junio de 2025).
- <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/evaluacion-recursos-hidricos-regimen-natural.html> (Accedido: 19 de septiembre de 2023).
- <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/reservas-naturales-fluviales.html> (Accedido: 16 de diciembre de 2024).

Estudio del impacto de un choque térmico agudo durante la gastrulación a través de una línea transgénica de pez cebra (*Danio rerio*)

Mario Barrio Robles¹, David G. Valcarce¹ y Vanesa Robles¹

¹ INDEGSAL, Área de Biología Celular, Departamento de Biología Molecular, Universidad de León, Campus de Vegazana 5 s/n, 24071, León, España.
mbarro2@estudiantes.unileon.es, dgarv@unileon.es, v.robles@unileon.es

Resumen

En este estudio se ha evaluado el impacto de un choque térmico agudo sobre el desarrollo embrionario del pez cebra (*Danio rerio*). El estresor (1 h; 38 °C) fue aplicado al inicio de la gastrulación en la especie (6 horas post fecundación (hpf)). Embriones de la línea transgénica *Tg(hsp70l:dn-fgfr1a-EGFP)*, con inhibición inducible de la vía del factor de crecimiento de fibroblastos (Fgf), fueron utilizados para evaluar los efectos del estresor. El marco temporal de monitorización englobó la embriogénesis en la especie (hasta las 72 hpf). Se evaluaron los siguientes parámetros: supervivencia (0 hpf, 24 hpf, 48 hpf y 72 hpf), eclosión (48 hpf y 72 hpf), malformaciones (72 hpf) y comportamiento (24 hpf). Nuestros resultados indican que el choque térmico no resulta letal en el marco de evaluación seleccionado, pero provoca una reducción de la tasa de eclosión y un elevado número de malformaciones en la línea *Tg(hsp70l:dn-fgfr1a-EGFP)*. Además, nuestros datos muestran alteraciones en el comportamiento a 24 hpf. Estos hallazgos evidencian que estresores agudos de muy corta duración pueden provocar serias alteraciones fisiológicas en etapas del desarrollo temprano, cuando el embrión muestra una mayor vulnerabilidad.

Palabras clave

Desarrollo embrionario, estrés, *Fgfr1a*, *hsp70*.

Introducción

Desarrollo embrionario

El desarrollo embrionario temprano en peces es un proceso muy sensible a condiciones ambientales, especialmente durante fases críticas tales como la gastrulación. Este es un momento crucial del desarrollo embrionario en el que se establecen los ejes corporales y se originan las capas germinales que darán lugar a todos los tejidos y órganos del animal (Solnica-Krezel, 2006). De hecho, la gastrulación se puede considerar como el primer proceso morfogénético a gran escala durante el desarrollo, coincidiendo, con la segregación de las capas

embrionarias: ectodermo y endodermo en animales diblásticos y el mesodermo en animales triblásticos (Rohde y Heisenberg, 2007; Muhr *et al.*, 2023). En el segundo grupo se incluyen los peces, vertebrados foco de estudio del presente trabajo. Durante esta etapa del desarrollo embrionario temprano destacan como eventos característicos los movimientos de las células embrionarias que alteran, en último término, la forma del organismo en desarrollo (Solnica-Krezel, 2006). Esta distribución de las células precursoras es necesaria, y clave, junto con otros procesos de intercalación, diferenciación y proliferación celular (Bruce y Heisenberg, 2020) para la correcta formación de las citadas capas embrionarias. Debido a la complejidad a nivel molecular que implican estos cambios morfofuncionales durante la embriogénesis, los ejemplares exhiben gran vulnerabilidad frente a factores externos o estresores (Nunes *et al.*, 2020) que pueden alterar la correcta orquestación en los programas de expresión génica que regulan el proceso. En consecuencia, la gastrulación constituye un punto crítico para evaluar los efectos del estrés ambiental.

Estrés

El estrés, al que podemos definir como un estímulo que afecta al mantenimiento de la propia homeostasis (Chrousos, 2009; Herman, 2013), puede ser categorizado como agudo o crónico (Demin *et al.*, 2021) en función de la duración y del tipo de respuestas moleculares y fisiológicas que se generan en el organismo (Schreck y Tort, 2016). Por otro lado, y en función de su origen, puede categorizarse como externo o interno, destacándose dentro del primer tipo, el ambiental (Kagias *et al.*, 2012). Los seres vivos están adaptados a vivir en rangos determinados para cada parámetro abiótico, sin embargo, alteraciones de las condiciones fuera del margen de tolerancia de la especie, producen la aparición de estrés ambiental (Kagias *et al.*, 2012). Uno de los tipos de estrés ambiental más ampliamente estudiado es el estrés térmico. Éste se puede definir como la respuesta de un organismo a una exposición aguda o crónica a una temperatura fuera de sus rangos óptimos, ya sea por encima (hipertermia) o por debajo (hipotermia). Numerosos estudios han evidenciado que desviaciones significativas de la temperatura óptima, incluso si son transitorias, pueden generar serias alteraciones en el organismo (Blatteis, 2007; Haapanen-Saaristo, 2024; Miller *et al.*, 2025). Los determinados “choques térmicos agudos” o “*heat shocks*” (incrementos o descensos repentinos de temperatura durante un corto periodo de tiempo) pueden desencadenar respuestas celulares de estrés, alterando el ciclo celular e incluso induciendo apoptosis, dependiendo del momento del desarrollo en el que ocurran (Nakai e Ishikawa, 2001).

El uso de estrés térmico puntual en experimentos controlados permite evaluar el impacto de perturbaciones breves pero intensas, que resultan especialmente relevantes en estudios sobre los efectos del estrés. Además, resultan de interés para la comunidad científica para comprender mejor cómo eventos tales como olas de calor, cambios térmicos abruptos en aguas superficiales o fallos en

sistemas de regulación térmica en instalaciones de acuicultura, que pueden exponer a los embriones de distintas especies acuáticas a picos de temperatura de corta duración, cuyas consecuencias pueden ser impredecibles y potencialmente negativas.

Pez cebra como modelo

Para poder realizar un estudio preciso sobre como el estrés térmico agudo durante el inicio de la gastrulación puede afectar al desarrollo, hemos utilizado como especie modelo el pez cebra (*Danio rerio* (Hamilton-Buchanan, 1822)). Este cipriniforme habita los ríos, lagos y estanques del sudeste asiático (Istiaque y Khan, 2018). Es un organismo modelo de vertebrados muy utilizado en biología del desarrollo debido a diversas propiedades (Bedell *et al.*, 2025), entre las que se encuentra un fácil manejo en laboratorio y mantenimiento, su pequeño tamaño, su fecundación externa y su elevada prolificidad—una hembra puede poner cientos de huevos en condiciones de estabulación óptimas (Hisaoaka y Firlit, 1962)—. Otra característica importante es el gran tamaño (1 mm aproximadamente) y la transparencia de sus huevos, embriones y larvas en los primeros días tras la fecundación, permitiendo la visualización del desarrollo embrionario (Kimmel *et al.*, 1995) y la monitorización de moléculas trazables *in vivo* (Ignatiusy Langenau, 2011). Estas características lo convierten en un organismo excepcional para el estudio de los efectos del estrés, especialmente aquellos involucrando alteraciones ambientales. En base al foco de interés del presente estudio, cabe destacar que el pez cebra adulto puede sobrevivir en un espectro amplio de temperaturas: desde 16,5 °C hasta 38,6 °C, teniendo su óptimo entre 27 y 28,5 °C (Feugere *et al.*, 2021).

Tg(hsp70l:dn-fgfr1a-EGFP)

En este estudio, se seleccionó una exposición breve e intensa (1 h a 38°C) aplicada a las 6 horas post fecundación (hpf), momento correspondiente al inicio de la gastrulación en la especie (Kimmel *et al.*, 1995), con el objetivo de analizar si este tipo de estresor agudo puede alterar el desarrollo embrionario, afectando a supervivencia, eclosión, tasas de malformaciones y comportamiento. Para realizar este análisis se usó una línea transgénica: “hsp70” Tg(hsp70l:dn-fgfr1a-EGFP). Dicha línea presenta un gen de fusión *fgfr1-egfp* dominante negativo bajo el promotor de *heat shock protein 70* (*hsp70*). La proteína Hsp70 es una chaperona (una proteína que favorece el plegamiento de otras proteínas) que se ve sobreexpresada en condiciones de estrés celular. Bajo estas situaciones estresantes, la sobreexpresión celular de Hsp70 va acompañada, por lo tanto, de: 1) la expresión de un Fgfr1a (receptor 1a del factor de crecimiento de fibroblastos) aberrante que inhibe la función normal del receptor, por un lado y, 2) una expresión de GFP (*green fluorescent protein*), por otro. Así, la vía de señalización de Fgf (factor de crecimiento de fibroblastos) que se activaría gracias a la existencia de un receptor sin alterar, se ve inhibida en este transgénico al exponer al organismo a estrés celular, ya que es el promotor de *hsp70* quien controla la expresión génica del

receptor aberrante Fgfr1a. Esta vía de señalización es de suma importancia en la gastrulación ya que está involucrada en diversos procesos cruciales en el desarrollo, tales como el patrón de distribución de los ejes embrionarios (Dorey y Amaya, 2010) o para la formación del mesodermo (Ciruna y Rossant, 2001).

Objetivos

Evaluar el efecto de un choque térmico agudo aplicado durante el comienzo de la gastrulación en el desarrollo embrionario del pez cebra (*Danio rerio*), mediante el análisis de parámetros de viabilidad embrionaria, eclosión, malformaciones y comportamiento en la línea transgénica *Tg(hsp70l:dn-fgfr1a-EGFP)*.

Material y Métodos

Consideraciones éticas

El marco temporal en el que se desarrollaron los experimentos del presente trabajo nunca superó los tres días de vida de los peces. La legislación actual vigente en la UE (Directiva Europea 2010/63/EU) no protege a los ejemplares de pez cebra hasta superar los 5 días de vida, una vez completada la organogénesis de la especie, cuando las larvas son autónomas para su alimentación (Ng *et al.*, 2005). No se necesitaron permisos del Comité de Bioética de la Universidad de León (ULE) para la realización de este proyecto.

Modelos animales

El experimento se realizó con embriones de pez cebra (*D. rerio*) procedentes la línea transgénica (*Tg(hsp70l:dn-fgfr1a-EGFP)*) (**Fig. 1A**) que forma parte de la colonia de peces cebra del grupo REPRODOL en el Servicio de Investigación y Bienestar Animal de la ULE. Estos embriones fueron adquiridos y transportados desde el *European Zebrafish Resource Center* (EZRC) en Alemania. Los ejemplares fueron criados en las instalaciones del grupo hasta tener colonias de adultos reproductores. Los peces adultos utilizados como reproductores fueron mantenidos en condiciones estándar (Westerfield, 2000). Los ejemplares se mantuvieron alimentados dos veces al día con pienso comercial Zebrafeed (Sparos, Portugal), permaneciendo en sus tanques de estabulación bajo un fotoperiodo de 14 horas de luz - 10 horas de oscuridad y a una temperatura controlada de 27 ± 1 °C. Para la obtención de los embriones, la tarde previa al inicio de la réplica experimental, se prepararon los tanques de reproducción externos al sistema de estabulación, introduciendo 2 hembras y 1 macho separados por una barrera física (**Fig. 1B**). Pasada la noche, tras aproximadamente 30 min del encendido de las luces en la sala, se retiraron barreras físicas promoviendo el cortejo entre los peces. Tras 1-2 h, se devolvieron los peces a sus tanques y se recogieron los huevos fertilizados con la ayuda de un colador. Tras un lavado con agua, los embriones se pasaron con ayuda de una pipeta Pasteur de plástico a placas Petri de 55 mm

de diámetro con medio para embriones (ME: 0,137 M NaCl; 5,4 mM KCl; 0,25 mM Na₂HPO₄; 0,44 mM KH₂PO₄; 1,3 mM CaCl₂; 1,0 mM MgSO₄; 4,2 mM NaHCO₃; azul de metileno 0,1 % (p/v); pH = 7,00). Los embriones se mantuvieron en estas placas stock hasta la división en grupos experimentales.

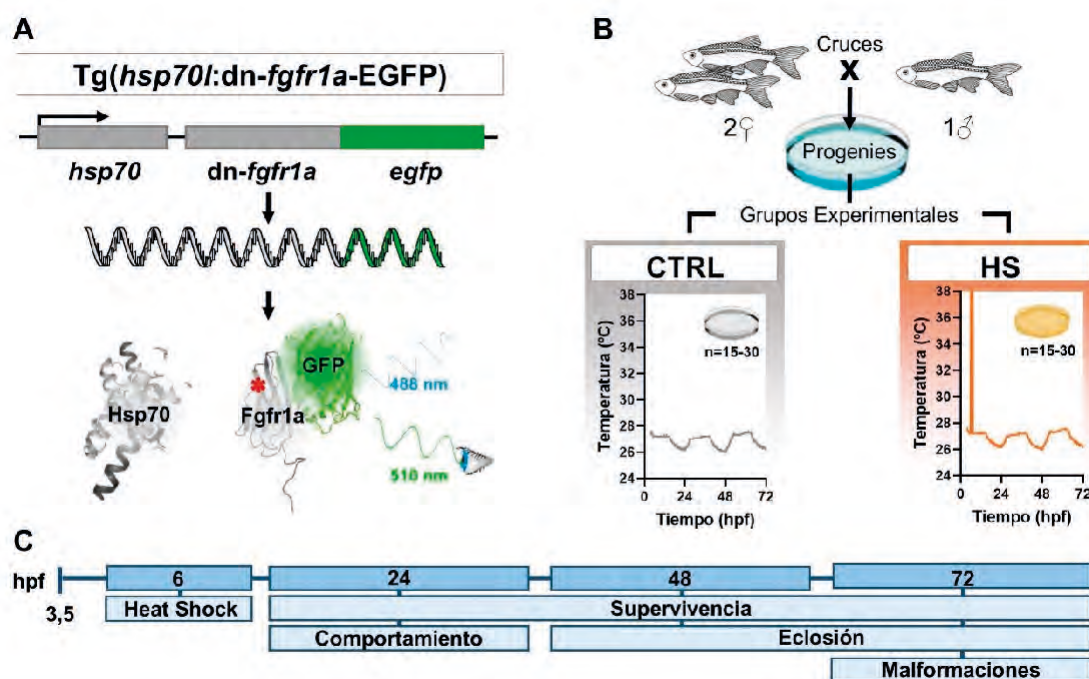


Figura 1. Representación gráfica del diseño experimental. **A)** Diagrama de la construcción génica presente en *Tg(hsp70l:dn-fgfr1a-EGFP)* (el asterisco rojo representa una forma aberrante de Fgfr1a). **B)** Representación secuencial del trabajo experimental y generación de grupos experimentales (entre 15 y 30 embriones por réplica biológica). **C)** Marco temporal del experimento y parámetros estudiados en cada punto temporal. hpf: horas post fecundación. HS: *heat shock*.

Diseño experimental

A partir de las placas stock, de cada réplica experimental se obtuvieron dos placas (**Fig. 1B**). Ambas fueron preparadas con el mismo número de huevos en cada una ($n = 15 - 30$). Cada pareja de placas respondía a una réplica biológica, donde una de ellas actuaba como placa control (CTRL) y la otra actuaba como placa sometida a choque térmico (*heat shock*; HS). Las placas del grupo CTRL fueron sometidas durante todo el experimento a temperatura estándar (27 ± 1 °C) mientras que las del grupo HS fueron expuestas a las 6 hpf (etapas iniciales de la gastrulación (Kimmel *et al.*, 1995)) a 38 °C durante 1 hora. El resto del tiempo, las placas HS se mantuvieron junto a las placas control a la temperatura estándar en la sala del animalario (**Fig. 1B**). Los parámetros analizados en cada punto temporal del experimento están recogidos en la **Figura 1C**. El marco temporal del experimento incluyó desde este momento de generación de las placas experimentales (3,5 hpf) hasta las 72 hpf, fin de la embriogénesis (Kimmel *et al.*,

1995). En total se realizaron 13 réplicas biológicas. Los ejemplares incluidos en las placas experimentales fueron seleccionados siguiendo un criterio basado en la observación mediante un microscopio estereoscópico (Kyowa Optical SD - 2PL). Sólo aquellos embriones presentando un patrón de desarrollo canónico (Kimmel *et al.*, 1995) fueron escogidos para las placas (**Fig. 2A**).

Supervivencia

La supervivencia se cuantificó a lo largo de tres instantes distribuidos en el marco temporal: 24 hpf, 48 hpf y 72 hpf. Para realizar esta tarea se revisaban las placas que contenían a los embriones a través del microscopio estereoscópico, analizando la supervivencia mediante una comprobación del latido del corazón de los individuos. Al encontrar embriones muertos se retiraban de la placa con la ayuda de una pipeta Pasteur de plástico.

Eclosión

A las 48 hpf, con la ayuda del microscopio estereoscópico, se cuantificaron los ejemplares que hubieran salido del corion—la envoltura acelular que protege al embrión—, de forma prematura. Asimismo, este procedimiento se repitió a las 72 hpf con el fin de localizar, en caso de haberlos, los embriones sin eclosionar, valorando así la tasa de eclosión en las placas a 48 y 72 hpf.

Malformaciones

El análisis de individuos malformados se realizó a las 72 hpf comparando la morfología de todas las larvas presentes en las placas con el estadio de boca protuberante descrito por Kimmel (Kimmel *et al.*, 1995) para este punto temporal.

Estudio de comportamiento

A 24 hpf, se cuantificó el número de movimientos por minuto que realizaban los embriones en el corion a través de grabaciones de vídeo capturados con la ayuda de la lupa Nikon SMZ25 (cámara DS-Ri2) y el software NISElements AR v.6 (Nikon). El procedimiento consistió en una grabación de un minuto por placa en la que todos los embriones de la réplica estuvieran en campo. En una etapa posterior, los vídeos fueron editados para multiplicar la velocidad cuatro veces empleando la aplicación de uso libre CapCut y se contabilizaron el número de movimientos que realizaba cada embrión de cada placa.

Análisis estadístico

Para el procesamiento estadístico y el graficado de los datos se utilizó el software GraphPad v8.0.1. La curva de supervivencia fue analizada con una prueba de Mantel-Cox. La normalidad de todas las variables fue testada con un test de Shapiro-Wilk. La comparación de variables normales se realizó usando un test *t*

de Student, con corrección de Welch en el caso de trabajar con variables con desviaciones estándar no iguales. La comparación entre variables no paramétricas se llevó a cabo mediante una prueba de Mann-Whitney. Se describe la n correspondiente al número de réplicas biológicas en cada pie de figura. En las gráficas las barras de error representan medias \pm error estándar de la media (SEM). Los valores de $p < 0,05$ fueron considerados estadísticamente significativos.

Resultados

Supervivencia

El análisis de supervivencia diaria (**Fig. 2B**) generó curvas de Kaplan-Meier que se mantuvieron por encima del 75 % de supervivencia tanto en las réplicas CTRL y las HS a las 72 hpf (**Fig. 2C**). No se reportaron diferencias estadísticamente significativas al comparar las curvas de supervivencia ($p = 0,0722$; **Fig. 2C**).

Eclosión

Al analizar estadísticamente los valores de porcentaje de eclosión (**Fig. 2D**) a 48 hpf no se encontraron diferencias significativas ($p = 0,1716$), mientras que a las 72 hpf la línea si registró diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,0011$; **Fig. 2D**) siendo el valor medio la tasa de eclosión del grupo experimental HS de $67,85 \pm 9.162$ % mientras que en el grupo CTRL se mantuvo cercano al 100 %.

Malformaciones

El análisis estadístico de la tasa de malformaciones al final de la embriogénesis reveló diferencias estadísticamente significativas entre los grupos experimentales ($p = 0,0053$) (**Fig. 2E**). El grupo HS mostró una tasa media de malformaciones en las placas por encima del 35 % mientras que el grupo CTRL entorno al 5 %. A su vez, se identificó que el tipo de malformaciones mayoritario (**Fig. 2F**) en el grupo control fueron malformaciones únicas (edema cardiaco, malformación esquelética) mientras que en el grupo HS las malformaciones múltiples (combinaciones de varios tipos de malformaciones en un mismo ejemplar) supusieron un 93,3 % del total de fenotipos encontrados en las larvas.

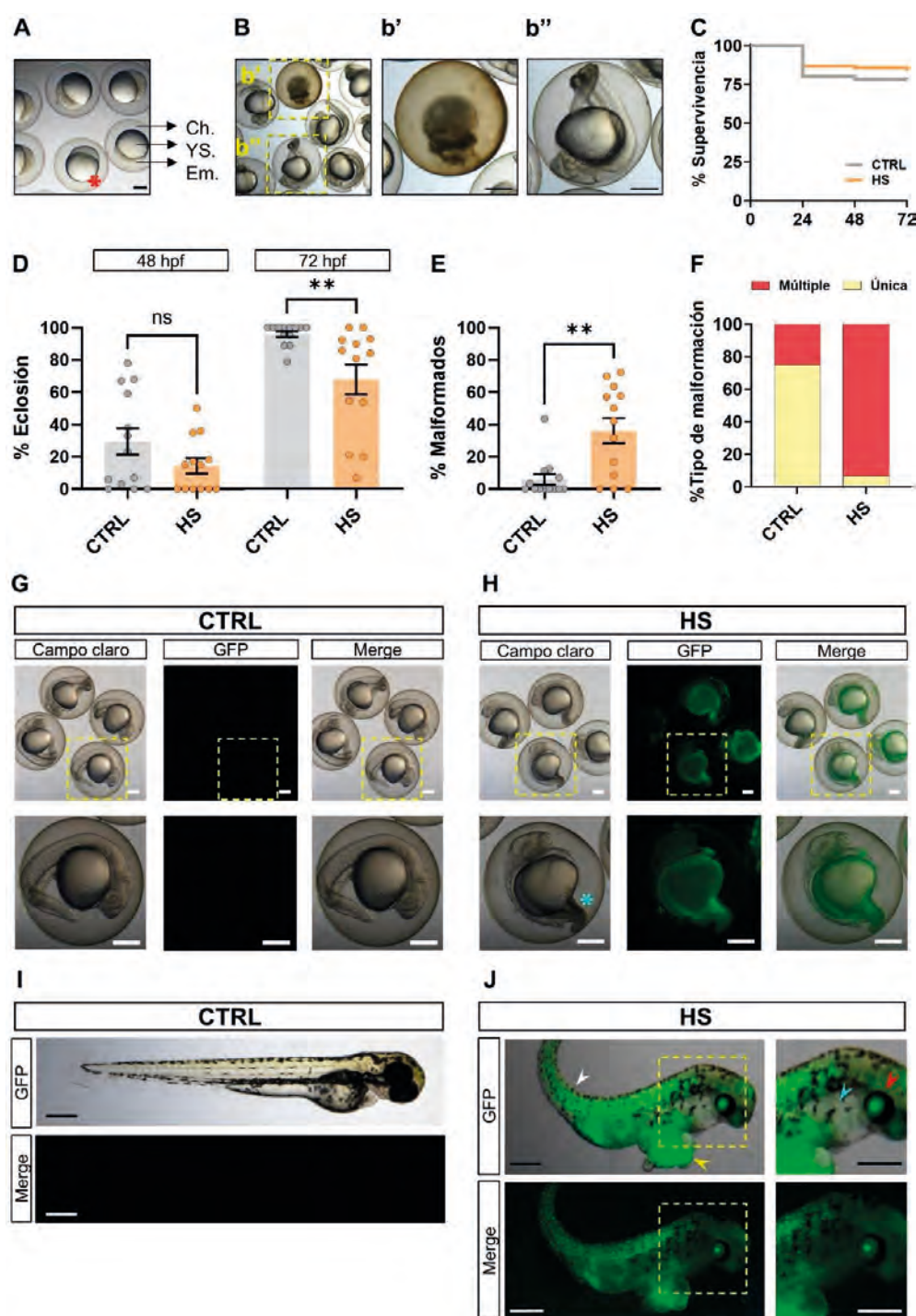


Figura 2. Impacto del choque térmico (HS) durante la gastrulación en *D. rerio*. **A)** Embriones a 3–3.5 hpf; asterisco rojo: ovocito no fecundado. Ch: corion; YS: saco vitelino; Em: embrión. **B)** Embriones a 24 hpf: **b'**) abortado; **b''**) viable. **C)** Supervivencia. **D)** Eclosión a 48/72 hpf. **E)** Malformaciones a 72 hpf. **F)** Tipología de malformaciones. **G–H)** Fenotipos a 24 hpf; en H, asterisco celeste: cola aberrante. **I–J)** Fenotipos a 72 hpf; flechas: blanca, defecto esquelético; amarilla, reabsorción vitelina incompleta; celeste, edema; roja, microftalmia. Escala: 250 μ m. $p < 0,0100$; $ns > 0,0500$. $n = 13$.

El impacto del choque térmico durante la gastrulación fue evidenciado a las 24 hpf. Mientras que los embriones del grupo CTRL presentaron un fenotipo canónico a las 24 hpf (**Fig. 2G**), los embriones del grupo HS mostraron a lo largo de todo su cuerpo una elevada expresión de GFP derivada del control de su expresión bajo el promotor de *heat shock protein 70* (**Fig. 2H**). Esta fluorescencia fue concomitante con la aparición de colas aberrantes y desarrollo corporal afectado al expresarse la forma incorrecta de Fgfr1a.

A las 72 hpf, a diferencia de las réplicas del grupo CTRL (**Fig. 2I**), las larvas del grupo HS (**Fig. 2J**), presentaban fenotipos severos en muchos de los casos acumulando malformaciones múltiples que correlacionaban con una elevada expresión de la proteína verde fluorescente en todo el cuerpo de la larva y una reducción notable en el tamaño de las larvas.

Comportamiento

El análisis estadístico realizado reveló que el *tail coiling* (número de movimientos que los embriones realizan en el interior del corion; **Fig. 3A**) por minuto y réplica a las 24 hpf, se vio reducido en el grupo HS ($p = 0,0050$; con una media en el grupo CTRL de $3,911 \pm 0,4567$ frente a la media de $2,214 \pm 0,3037$ en el grupo HS; **Fig. 3B**). El histograma presentado en la **Figura 3C** muestran una diferente distribución de los perfiles obtenidos en cada población total de individuos estudiados, con una población elevada de ejemplares sin movimientos en el interior del corion.

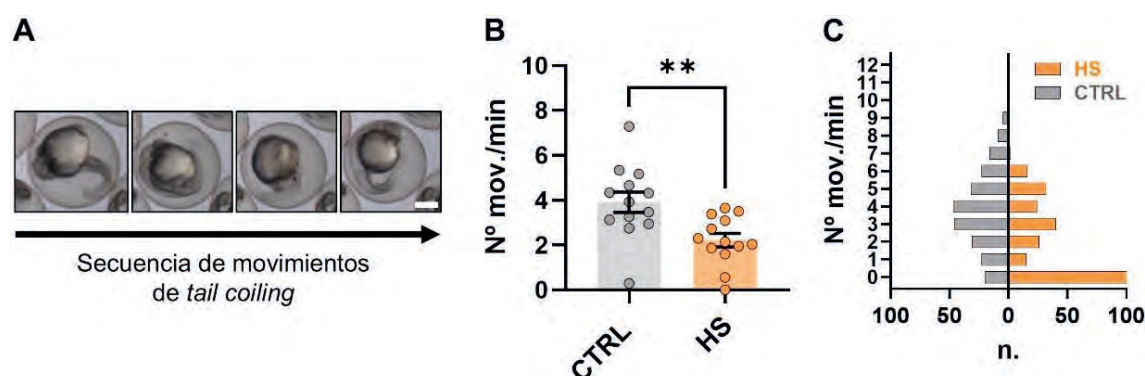


Figura 3. Impacto del choque térmico durante la gastrulación en el comportamiento del pez cebra a 24 hpf. **A)** Secuencia de movimientos realizada por un embrión, representativa del *tail coiling*. **B)** Número medio de movimientos por minuto y réplica de los embriones (test de *t* de Student). **C)** Histograma de movimientos individuales. Escala: 250 μ m. ** $p < 0,0100$. $n = 13$.

Discusión

El pez cebra (*D. rerio*) se considera un excelente modelo animal para el estudio del estrés durante las primeras etapas de desarrollo. Esto es debido a las características de sus embriones (Bedell *et al.*, 2025), a su desarrollo embrionario acelerado (Kimmel *et al.*, 1995) y a su sistema de respuesta al estrés (Eachus

et al., 2021). En este trabajo hemos expuesto a los embriones de pez cebra a una temperatura supra-óptima con el fin de estudiar cómo afecta este estresor durante etapas clave del desarrollo temprano, desde un punto de vista fisiológico y morfológico.

La curva de supervivencia es uno de los indicadores más evidentes del desarrollo general de las progenies en peces ante estresores (Curcio *et al.*, 2021; Valcarce *et al.*, 2024) y en condiciones de laboratorio estándar varía entre 70 y 90 % (Lawrence *et al.*, 2010). El estrés térmico inducido en nuestro estudio no reveló diferencias entre las curvas de supervivencia de los embriones en grupos CTRL y HS (**Fig. 2C**) indicando que, el choque térmico analizado no tiene efectos sobre la tasa de supervivencia en el marco temporal estudiado. En experimentos previos con mayores periodos de exposición al estresor, se han registrado descensos significativos en la supervivencia tanto en condiciones de hipotermia o hipertermia. De Souza *et al.* (2025) realizando una exposición a temperaturas sub-óptimas (22 °C durante 120 hpf) y Schnurr *et al.* (2014) exponiendo a los embriones a hipertermia durante todo el proceso de embriogénesis (34 °C, 36 °C y 38 °C desde 0 hpf a 72 hpf) obtuvieron descensos significativos en supervivencia, pero en ambos casos, el periodo de exposición al estresor era muy superior al de este estudio. Es precisamente la ausencia de diferencias en la supervivencia lo que confiere un valor añadido a este estudio, al permitir analizar los efectos fisiológicos y moleculares de estresores sutiles cuya influencia no se manifiesta en parámetros tan evidentes como la mortalidad. La eclosión de las larvas es una etapa crítica en el ciclo de vida de los metazoos y se corresponde a la liberación de los individuos del corion, lo que supone el final de la embriogénesis y el inicio de la etapa larvaria (Gilbert, 2000). La eclosión en los peces ocurre cuando la morfogénesis de muchos de los órganos rudimentarios ya está prácticamente completada, con algunas excepciones que terminan su desarrollo a las 120 hpf (Kimmel *et al.*, 1995). Las alteraciones de la eclosión (retraso, inhibición o aceleración) en los peces pueden ser causadas por diversos factores endógenos y exógenos, incluyendo los contaminantes ambientales (De La Paz *et al.*, 2017). El impacto de nuestro estresor térmico agudo provocó una reducción en la capacidad de eclosión a las 72 hpf (**Fig. 2D**). En condiciones de laboratorio estándar, la eclosión se produce entre las 48 hpf (los individuos más tempranos) y a las 72 hpf (las larvas más tardías) (Kimmel *et al.*, 1995). La reducción en la tasa de eclosión en esta especie es utilizada habitualmente como un indicador del impacto provocado de factores externos tales como presencia de tóxicos en el medio (Li *et al.*, 2018) o internos tales como mutaciones en genes clave (Elabd *et al.*, 2019). Nuestros datos, mostrando esta reducción de la tasa de eclosión a 72 hpf en la línea *hsp70* (**Fig. 2D**), pueden estar vinculados con la elevada tasa de malformaciones múltiples registrada en este grupo experimental (**Fig. 2F**), provocando que las larvas se vean incapacitadas para liberarse del corion. Si comparamos nuestros resultados con los obtenidos por Pype *et al.* (Pype *et al.*, 2015), quienes observaron una reducción en la tasa de eclosión al mantener los embriones con hipertermia (36,5 °C) durante

las primeras 96 hpf, se refuerza la idea de que la eclosión es un proceso con una dependencia multifactorial, en el que influye tanto la duración y naturaleza del estresor, como el tipo de la respuesta génica asociada.

Por otro lado, en nuestro estudio, la exposición al estresor incrementó significativamente el porcentaje de embriones malformados superando el 35 % de las larvas analizadas (**Fig. 2E**). La línea transgénica *Tg(hsp70l:dn-fgfr1a-EGFP)* incorpora una construcción génica que explica la aparición de fenotipos severamente malformados en los embriones expuestos al choque térmico (**Fig. 2F, 2H y 2J**). La señalización celular mediada por Fgf participa en la proliferación, migración y especificación de numerosos tipos celulares (Thisse y Thisse, 2005), siendo crucial en desarrollo y estando altamente conservada en diferentes especies (Itoh, 2007). En consecuencia, la sobre-expresión de Hsp70 media la expresión del mutante negativo Fgfr1a en condiciones de estrés desencadenando una desregulación inhibitoria de las vías mediadas por este receptor. El uso de esta línea resulta especialmente valioso, ya que permite inducir de forma controlada una inhibición específica de la señalización Fgf mediante un estímulo ambiental (el calor). Esto la convierte en una herramienta experimental potente para estudiar los mecanismos moleculares y celulares implicados en la respuesta al estrés térmico, así como para evaluar cómo la alteración de vías conservadas del desarrollo puede amplificar los efectos de estresores ambientales. En nuestro estudio pudimos observar que a 72 hpf, ningún individuo del grupo control presentó malformaciones múltiples, mientras que la mayoría de los ejemplares malformados del grupo sometido a choque térmico las mostraron (**Fig. 2F**).

El comportamiento constituye un indicador del estado fisiológico y neurológico de los organismos, reflejando de manera temprana los efectos de la exposición a estresores (de Abreu *et al.*, 2021). El comportamiento de los embriones de pez cebra se puede medir a través del número de movimientos que realizan con la cola por minuto, también llamado *tail coiling*. Se trata de contracciones musculares del tronco que suponen sus primeras respuestas motoras (**Fig. 3A**), iniciando a las 17 hpf, alcanzando su máximo a las 19 hpf y decayendo a partir de las 26 hpf (de Olivera *et al.*, 2021). Por norma general, una reducción del número de movimientos por minuto en el embrión, suele estar vinculado a problemas en el desarrollo (Zindler *et al.*, 2019). Basándonos en lo discutido previamente en relación a la tasa de malformaciones presente en los ejemplares de la línea “*hsp70*”, los resultados de la evaluación del *tail coiling* es la esperada (**Fig. 3B y 3C**). En esta línea transgénica, el grupo experimental HS sometido a choque térmico muestra una reducción muy drástica de los valores del número de movimientos por minuto comparado con el grupo CTRL, no perturbado durante el experimento. La expresión del alelo dominante negativo de Fgfr1a frente al choque térmico induce una deficiencia severa en la locomoción tal como refleja el valor medio del *coiling*. La hipoactividad registrada en las larvas de las placas HS se asemeja a la registrada en ensayos con exposición a ciertos neurotóxicos (Zindler *et al.*, 2019), lo que sugiere que un choque térmico agudo durante la gastrulación puede ejer-

cer un efecto comparable a un agente neurotóxico sobre el comportamiento. Este hallazgo refuerza la relevancia del modelo empleado, ya que pone de manifiesto su sensibilidad para detectar alteraciones funcionales sutiles derivadas de estresores tempranos, consolidándolo como una herramienta útil para explorar los vínculos entre estrés ambiental, desarrollo neurológico y desempeño conductual.

Conclusiones

En resumen, nuestros hallazgos subrayan el impacto significativo de un estresor agudo durante el inicio de la etapa de gastrulación en el pez cebra como organismo modelo. El choque térmico agudo empleado no afectó a las curvas de supervivencia durante la embriogénesis en la línea transgénica utilizada, pero provocó una reducción de la tasa de eclosión y un elevado número de malformaciones en las larvas. El análisis de *tail coiling* a 24 hpf reveló que el pico de estrés en el inicio de la gastrulación afectó de manera temprana el comportamiento de los embriones. Estos resultados ponen de manifiesto que los estresores abióticos pueden inducir alteraciones fisiológicas diversas, incluyendo las conductuales, en vertebrados en desarrollo incluso cuando la exposición es breve, subrayando la sensibilidad de etapas críticas del desarrollo frente a perturbaciones ambientales.

Bibliografía

- Bedell, V. M., Dubey, P., Lee, H. B., Bailey, D. S., Anderson, J. L., Jamieson-Lucy, A., Xiao, R., Leonard, E. V., Falk, M. J., Pack, M. A., Mullyns, M., Farber, S. A., Eckenoff, R. G. y Ekker, S. C. 2025. Zebrafishology, study design guidelines for rigorous and reproducible data using zebrafish. *Communications Biology*. 8:1-14. doi:10.1038/s42003-025-07496-z.
- Blatteis, C. M. 2007. Thermal Stress. *Encyclopedia of Stress*. Academic Press, pp. 723-726. doi:10.1016/B978-012373947-6.00375-5.
- Bruce, A. E. E. y Heisenberg, C. P. 2020. Mechanisms of zebrafish epiboly: A current view. *Current Topics in Developmental Biology*. Academic Press Inc., 136, pp. 319-341. doi:10.1016/bs.ctdb.2019.07.001.
- Chrousos, G. P. 2009. Stress and disorders of the stress system. *Nature Reviews Endocrinology*. Nature Publishing Group, 5(7), pp. 374-381. doi:doi.org/10.1038/nrendo.2009.106.
- Ciruna, B. y Rossant, J. 2001. FGF Signaling Regulates Mesoderm Cell Fate Specification and Morphogenetic Movement at the Primitive Streak. *Developmental Cell*. 1(1), pp. 37-49. doi:10.1016/S1534-5807(01)00017-X.
- Curcio, V., Macirella, R., Sesti, S., Pellegrino, D., Ahmed, A. I. M. y Brunelli, E. 2021 Morphological and Molecular Alterations Induced by Lead in Embryos and Larvae of *Danio rerio*. *Applied Sciences*. 11:7464. doi:10.3390/APP11167464.
- de Abreu, M. S., Demin, K. A., Giacomini, A. C. V. V., Amstislavskaya, T. G., Strekalova, T., Maslov, G. O., Kositsin, Y., Petersen, E. V. y Kalueff, A. V. 2021. Understanding how stress responses and stress-related behaviors have evolved in

- zebrafish and mammals. *Neurobiology of Stress*. Elsevier Inc., 15. doi:10.1016/j.ynstr.2021.100405.
- De La Paz, J. F., Beiza, N., Paredes-Zúñiga, S., Hoare, M. S. y Allende, M. L. 2017. Triazole Fungicides Inhibit Zebrafish Hatching by Blocking the Secretory Function of Hatching Gland Cells. *International Journal of Molecular Sciences*. 18:710. doi:10.3390/IJMS18040710.
- de Oliveira, A. A. S., Brigante, T. A. V. y Oliveira, D. P. 2021. Tail Coiling Assay in Zebrafish (*Danio rerio*) Embryos: Stage of Development, Promising Positive Control Candidates, and Selection of an Appropriate Organic Solvent for Screening of Developmental Neurotoxicity (DNT). *Water*. 13:119. doi:10.3390/W13020119.
- de Souza, A. M., da Silva Junior, F. C., Dantas, É. D., Galvão-Pereira, M. C., de Medeiros, S. R. B. y Luchiari, A. C. 2025. Temperature effects on development and life-long behavior in zebrafish. *Science of The Total Environment*. Elsevier, 973, p. 179172. doi:10.1016/J.SCITOTENV.2025.179172.
- Demin, K. A., Taranov, A. S., Ilyin, N. P., Lakstygai, A. M., Volgin, A. D., de Abreu, M. S., Strekalova, T. y Kalueff, A. V. 2021. Understanding neurobehavioral effects of acute and chronic stress in zebrafish. *Stress*. Taylor and Francis Ltd., 24(1), pp. 1-18. doi:10.1080/10253890.2020.1724948.
- Dorey, K. y Amaya, E. 2010. FGF signalling: diverse roles during early vertebrate embryogenesis. *Development*. The Company of Biologists, 137(22), pp. 3731- 3742. doi:10.1242/DEV.037689.
- Eachus, H., Choi, M. K. y Ryu, S. 2021. The Effects of Early Life Stress on the Brain and Behaviour: Insights From Zebrafish Models. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. Frontiers Media S.A., 9, p. 657591. doi:10.3389/FCELL.2021.657591/XML/NLM.
- Elabd, S., Jabeen, N. A., Gerber, V., Peravali, R., Bourdon J. C., Kancherla, S., Vallone, D. y Blattner, C. 2019. Delay in development and behavioural abnormalities in the absence of p53 in zebrafish. *PLOS ONE*. Public Library of Science, 14(7), p. e0220069. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0220069.
- Feugere, L., Bates, A., Emagbetere, T., Chapman, E., Malcolm, L. E., Bulmer, K., Hardege, J., Beltran-Alvarez, P. y Wollenberg Valero, K. C. 2023. Heat induces multiomic and phenotypic stress propagation in zebrafish embryos. *PNAS Nexus*. Oxford Academic, 2(5), pp. 1-14. doi:10.1093/PNASNEXUS/PGAD137.
- Feugere, L., Scott, V. F., Rodriguez-Barucg, Q., Beltran-Alvarez, P. y Wollenberg Valero, K. C. 2021. Thermal stress induces a positive phenotypic and molecular feedback loop in zebrafish embryos. *Journal of Thermal Biology*. Elsevier Ltd, 102. doi:10.1016/j.jtherbio.2021.103114.
- Gilbert, S. F. 2000. Fertilization: Beginning a new organism. Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts (MA), EE. UU.
- Gilbert, S. F. 2000. Life cycles and the evolution of developmental patterns. Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts (MA), EE. UU.

- Haapanen-Saaristo, A. M., Virtanen, N., Tcarenkova, E., Vaparanta, K., Ampuja, M., Vehniäinen, E. R. y Paatero, Y. 2024. Heat stress sensitizes zebrafish embryos to neurological and cardiac toxicity. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. Elsevier B.V., 733. doi:10.1016/j.bbrc.2024.150682.
- Herman, J. P. 2013. Neural control of chronic stress adaptation. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*. Front Behav Neurosci, 7(MAY). doi:10.3389/FNBEH.2013.00061.
- Hisaoka, K. K. y Firlit, C. F. 1962). Ovarian Cycle and Egg Production in the Zebrafish, *Brachydanio rerio*. *Copeia*. JSTOR, 1962(4), p. 788. doi:10.2307/1440680.
- Ignatius, M. S. y Langenau, D. M. 2011. Fluorescent Imaging of Cancer in Zebrafish. *Methods in Cell Biology*. Academic Press Inc., 105, pp. 437-459. doi:10.1016/B978-0-12-381320-6.00019-9.
- Istiaque, A. y Khan, S. I. 2018. Impact of Ambient Temperature on Electricity Demand of Dhaka City of Bangladesh. *Energy and Power Engineering*. Scientific Research Publishing, Inc, 10(07), pp. 319-331. doi:10.4236/EPE.2018.107020.
- Itoh, N. 2007. The Fgf families in humans, mice, and zebrafish: Their evolutionary processes and roles in development, metabolism, and disease, *Biological and Pharmaceutical Bulletin*. 30(10), pp. 1819-1825. doi:10.1248/BPB.30.1819.
- Kagias, K., Nehammer, C. y Pocock, R. 2012. Neuronal responses to physiological stress. *Frontiers in Genetics*. Frontiers, 3(OCT), p. 30910. doi:10.3389/FGENE.2012.00222/XML/NLM.
- Kimmel, C. B., Ballard, W. W., Kimmel, S. R., Ullmann, B. y Schilling, T. F. 1995. Stages of embryonic development of the zebrafish, *Developmental Dynamics*. 203:253-310. doi:10.1002/AJA.1002030302.
- Lawrence, C., Sanders, G. E., Varga, Z. M., Baumann, D. P., Freeman, A., Baur, B. y Francis, M. 2010. Regulatory Compliance and the Zebrafish. *LibertPub*. Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, 6(4), pp. 453-456. doi:10.1089/ZEB.2009.0595.
- Li, J., Zhang, Y., Liu, K., He, Q., Sun, C., Han, J., Han, L. y Tian, Q. 2018. Xiaoaiping induces developmental toxicity in zebrafish embryos through activation of ER stress, apoptosis and the Wnt pathway. *Frontiers in Pharmacology*. Frontiers Media S.A., 9(NOV), p. 1250. doi:10.3389/FPHAR.2018.01250.
- Miller, A., Schröder, K. L., Braun, K. E., Steindorf, C., Ottermanns, R., Roß-Nickoll, M., Hollert, H. y Backhaus, T. 2025. Temperature-dependence of Early Development of Zebrafish and the Consequences for Laboratory Use and Animal Welfare. *bioRxiv*. Cold Spring Harbor Laboratory, p. 2025.02.13.638062. doi:10.1101/2025.02.13.638062.
- Muhr, J., Arbor, T. C. y Ackerman, K. M. 2023. Embryology, Gastrulation. *StatPearls*. StatPearls Publishing. Treasure Island, Florida (FL), EEUU.
- Nakai, A. y Ishikawa, T. 2001. Cell cycle transition under stress conditions controlled by vertebrate heat shock factors. *The EMBO Journal*. John Wiley

- & Sons, Ltd Chichester, UK, 20(11), pp. 2885-2895. doi:10.1093/EMBOJ/20.11.2885.
- Ng, A. N. Y., De Jong-Curtain, T. A., Mawdsley, D. J., White, S. J., Shin, J., Appel, B., Si Dong, P. D., Stainier, D. Y. R. y Heath, J. K. 2005. Formation of the digestive system in zebrafish: III. Intestinal epithelium morphogenesis. *Developmental Biology*. Academic Press, 286(1), pp. 114-135. doi:10.1016/J.YD-BIO.2005.07.013.
- Nunes, M. E. M., Schimith, L. E., Costa-Silva, D. G., Leandro, L. P., Martin I. K., De Mello, R. S., Nunes, F. V. M., Santer, M., Vieira, P. B., Posser, T. y Franco, J. L. 2020. Acute embryonic exposure of zebrafish to permethrin induces behavioral changes related to anxiety and aggressiveness in adulthood. *Journal of Psychiatric Research*. Elsevier Ltd, 121, pp. 91-100. doi:10.1016/j.jpsychires.2019.11.006.
- Pype, C., Verbueken, E., Saad, M. A., Casteleyn, C. R., Van Ginneken, C. J., Knapen, D. y Van Cruchten, S. J. 2015. Incubation at 32.5°C and above causes malformations in the zebrafish embryo. *Reproductive Toxicology*. Elsevier Inc., 56, pp. 56-63. doi:10.1016/j.reprotox.2015.05.006.
- Rohde, L. A. y Heisenberg, C. P. 2007. Zebrafish Gastrulation: Cell Movements, Signals, and Mechanisms. *International Review of Cytology*. Academic Press, 261, pp. 159-192. doi:10.1016/S0074-7696(07)61004-3.
- Schnurr, M. E., Yin, Y. y Scott, G. R. 2014. Temperature during embryonic development has persistent effects on metabolic enzymes in the muscle of zebrafish. *Journal of Experimental Biology*. Company of Biologists Ltd, 217(8), pp. 1370-1380. doi:10.1242/jeb.094037
- Schreck, C. B. y Tort, L. 2016. The Concept of Stress in Fish. *Fish Physiology*. Academic Press, 35, pp. 1-34. doi:10.1016/B978-0-12-802728-8.00001-1.
- Solnica-Krezel, L. 2006. Gastrulation in zebrafish - all just about adhesion? *Current Opinion in Genetics and Development*. 16(4), pp. 433-441. doi:10.1016/j.gde.2006.06.009.
- Thisse, B. y Thisse, C. 2005. Functions and regulations of fibroblast growth factor signaling during embryonic development. *Developmental Biology*. Academic Press Inc., 287(2), pp. 390-402. doi:10.1016/j.ydbio.2005.09.011.
- Unión Europea. 2010. Directiva 2010/63/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de septiembre de 2010, relativa a la protección de los animales utilizados para fines científicos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, (276), pp. 33-79.
- Valcarce, D. G., Sellés-Egea, A., Riesco, M. F., De Garnica, M. G., Martínez- Fernández, B., Herráez, M. P. y Robles, V. 2024. Early stress exposure on zebrafish development: effects on survival, malformations and molecular alterations. *Fish Physiology and Biochemistry*. Springer Science and Business Media B.V., 50(4), pp. 1545-1562. doi:10.1007/S10695-024-01355-0/METRICS.
- Westerfield, M. 2000. The zebrafish book. A guide for the laboratory use of zebrafish (*Danio rerio*). 4th ed., Univ. of Oregon Press, Eugene.

Zindler, F., Beedgen, F., Brandt, D., Steiner, M., Stengel, D., Baumann, L. y Braunbeck, T. 2019. Analysis of tail coiling activity of zebrafish (*Danio rerio*) embryos allows for the differentiation of neurotoxicants with different modes of action. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Academic Press, 186. doi:10.1016/j.ecoenv.2019.109754.

BAÚL DE LA CIENCIA

La importancia del tamaño en Biología: implicaciones del cambio de tamaño en el linaje humano.

Laura Rodríguez García^{1,2}

¹Dpto. de Biodiversidad y Gestión Ambiental, Área de Antropología Física, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071, León

²Laboratorio de Evolución Humana. Universidad de Burgos

lrodg@unileon.es

Resumen

El tamaño corporal es un rasgo biológico crucial que revela la estrategia adaptativa de una especie. Afecta tanto a los procesos fisiológicos (metabolismo, termorregulación, reproducción, etc....) como a las relaciones ecológicas (depredador/presa, tamaño de nicho ecológico, etc....). Su estimación es vital, especialmente en fósiles, para inferir parámetros como la densidad poblacional, la madurez sexual y la inversión parental, siendo el principal modulador del gasto energético total. Si tenemos en cuenta además la relación entre tamaño corporal y el tamaño cerebral, podemos conocer el grado de encefalización de la especie en estudio.

Un ejemplo en el registro fósil humano muestra que los neandertales y los homínidos de la Sima de los Huesos eran más pesados y bajos que los primeros humanos modernos, lo que implica un mayor requerimiento energético en ellos. Esta característica pudo dar a los humanos modernos una ventaja evolutiva clave frente a los neandertales en entornos con escasez de recursos debido a la Última Gran Glaciación.

El uso de estas variables, tamaño corporal, tamaño encefálico, metabolismo y gasto energético, permite acercarnos al estudio de la biología de una especie fósil e hipotetizar como eran y cuánta energía podían llegar a necesitar en su vida diaria.

Palabras clave

Cerebro, Crecimiento, Energía, Patrón de Historia Biológica, Tamaño.

El tamaño corporal de un ser vivo es, indiscutiblemente, el rasgo biológico más revelador para conocer la ecología de la especie. Actúa como una declaración de la estrategia adaptativa, codificando la respuesta evolutiva a las presiones de su entorno (Jungersl, 1990; Pélabon *et al.*, 2014), está íntimamente ligado al comportamiento en el mundo que la rodea, afecta directamente a los procesos

fisiológicos internos, como la gestión del calor y el ritmo metabólico (McNab, 1990) y determina las relaciones ecológicas con otras especies, ya sea como depredador o como presa (Eisenberg, 1990; Calder, 1996). Por todo ello, el tamaño y cómo calcularlo tiene una gran importancia cuando se busca interpretar otros parámetros biológicos o factores vitales de una especie, sobre todo cuando no hay manera de calcularlo de manera directa, como es el caso de los fósiles.

El tamaño corporal permite inferir la densidad de población que un hábitat puede sostener (Damuth, 1981), la edad de la madurez, el tamaño de la camada (Charnov y Berrigan, 1993), el espacio entre nacimientos y la inversión en cuidados parentales (Harvey y Clutton-Brock, 1985), entre otros muchos parámetros biológicos, todos ellos relacionados con el gasto energético de una especie. Por ejemplo, es de sobra conocido que los ratones tienen un metabolismo más acelerado, poca longevidad, poco tiempo entre camadas, una estrategia de reproducción de la *r*, mientras que los elefantes, en el otro extremo, gozan de mucha longevidad, tienen mucho tiempo entre camadas y una estrategia de reproducción de la *K* (**Fig. 1**). Por tanto, el tamaño corporal es el principal modulador del gasto energético total de un organismo (Leutenegger y Kelly, 1977; White y Seymour, 2003; Prado-Novoa *et al.*, 2023).

Cerebro grande, gran cerebro

En animales en general, el tamaño del cuerpo está fuertemente relacionado con el tamaño cerebral, tanto que, si sabemos el peso del individuo (en casi cualquier especie) podemos saber su tamaño cerebral ya que sigue una relación común (Martin, 1990, Ruff *et al.*, 1997); A esta relación se denomina encefalización (**Fig. 2**). Por regla general esta encefalización tiene un valor de 1 o cercano a 1, con lo que podemos decir que grandes animales requieren cerebros grandes.

Pero, en toda regla existe una excepción (o excepciones) y en este caso la excepción son los cetáceos y los primates. Esta excepción implica que, en estos dos grupos, el tamaño cerebral es mucho mayor al esperado en relación al tamaño corporal (**Fig. 2**). En este sentido el salto cualitativo dentro de los primates lo dan los homínidos, sobre todo a partir de hace casi medio millón de años. En nuestra especie y dependiendo del cálculo que se realice, los humanos tenemos un índice de encefalización de alrededor de 4, lo que implica que tenemos el cerebro 4 veces más grande que un mamífero de nuestro tamaño (Foley *et al.*, 1997). Por otro lado, el cerebro humano tiene un gran coste energético, casi el 20 % de gasto energético diario, cuando el peso del cerebro es únicamente un 2 % del peso corporal (Raichlen y Gusnard, 2002). Así pues, éste es un factor también importante a la hora de determinar una estrategia ecológica que pueda soportarlo. Tenemos un cerebro grande, pero sobre todo un gran cerebro.



Figura 1. Ejemplo de estrategias ecológicas diferenciales más importantes entre especies de muy distinto tamaño. Elaboración propia.

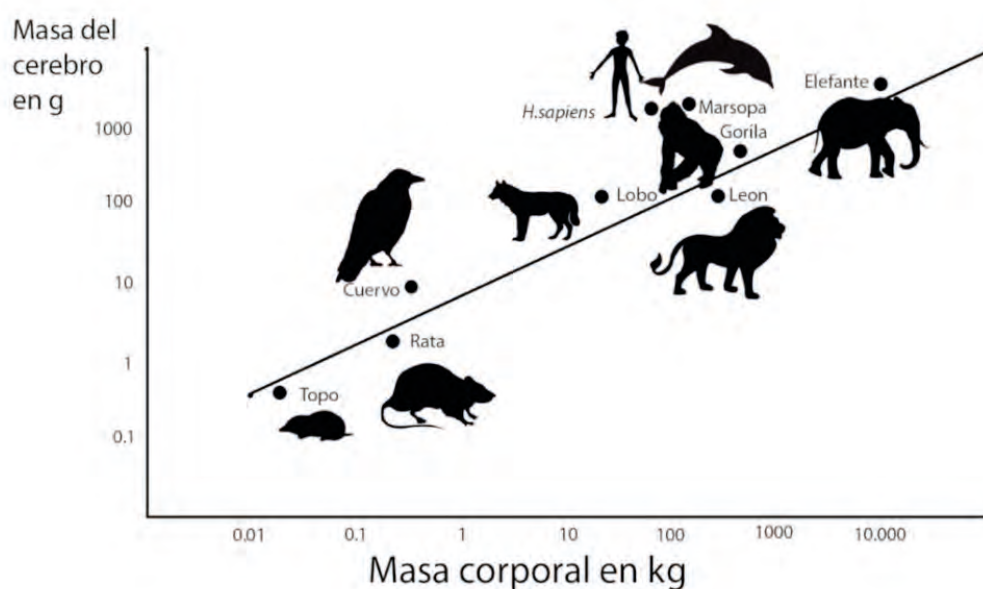


Figura 2. Relación entre el peso corporal y el peso del cerebro. $EBS = 0.60 \cdot \log_{10} BM + 2.68$ ($r=0.97$). Siendo EBS el tamaño del cerebro, BM la masa corporal en Kilos. Fórmula de Martin (1990).

El dilema evolutivo: Crecer o desaparecer

El análisis del tamaño de un linaje a lo largo del tiempo geológico sugiere la existencia de una fascinante, aunque compleja, tendencia evolutiva con la que se desarrolla una hipótesis, la conocida como la regla de Cope (o regla de Cope-Depéret). Esta hipótesis afirma que, dentro de un linaje evolutivo, el tamaño corporal tiende a aumentar a medida que transcurre el tiempo geológico, sin embargo, para algunos científicos esta hipótesis no está exenta de controversia (Monroe y Bokma, 2010). La lógica parece simple: ser más grande a menudo confiere ventajas en la competencia biológica, la defensa y la capacidad de explotar nuevos nichos. Pero, esta aparente ventaja tiene su lado oscuro, especialmente en periodos de crisis. Las grandes extinciones del Pleistoceno afectaron de forma desproporcionada a las especies más grandes con supervivencia de las más pequeñas (Damuth y MacFadden, 1990). La evolución del tamaño ha de ser, por tanto, un compromiso entre las ventajas del presente y la vulnerabilidad ante el hipotético cambio ambiental del futuro.

La gran solución: El cambio alométrico

Otro concepto esencial es que los cambios en tamaño en la naturaleza rara vez son uniformes (isométricos), sino que suelen ser alométricos, es decir, la forma de los organismos cambia al aumentar o disminuir el tamaño corporal de la especie con el tiempo y/o con el desarrollo. Este cambio de proporciones puede ocurrir durante el propio proceso de crecimiento de un individuo (no es la misma la forma de un recién nacido que la de una persona adulta, **Fig. 3**), a lo largo de la historia evolutiva de un linaje (no es igual un *Australopithecus* que un *Homo sapiens*, es decir, uno no es el cambio isométrico del otro), o debido al dimorfismo sexual, donde machos y hembras no solo difieren en tamaño, sino también en proporciones corporales (Pélabon *et al.*, 2014). Este cambio de forma es crucial, ya que permite que la estructura biológica se adapte a las leyes de la física a medida que la masa aumenta o disminuye.

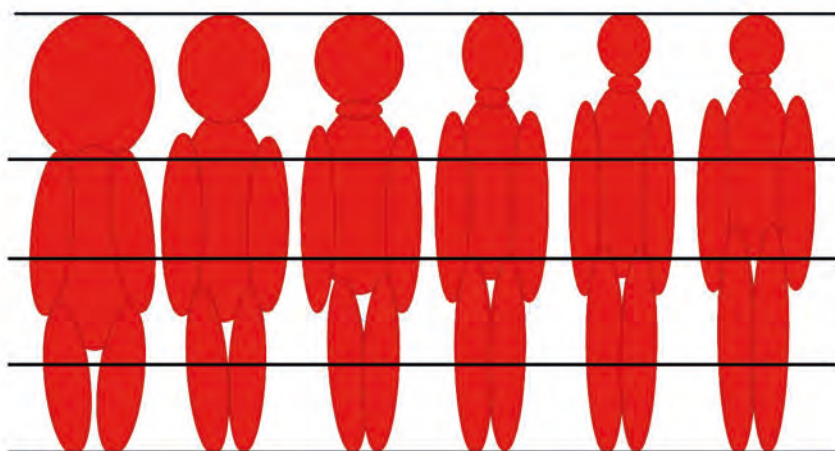


Figura 3. Alometría en el desarrollo del ser humano. Elaboración propia.

Desgranando el concepto de tamaño: Masa vs. estatura

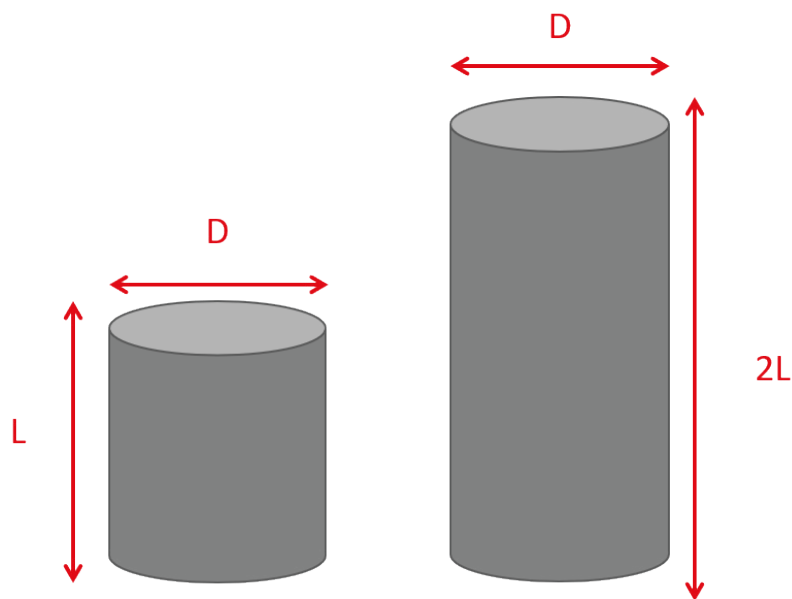
En la investigación biológica y, por supuesto en la antropología, el concepto de tamaño corporal puede ser ambiguo porque existe una mezcla del concepto de masa corporal pero también puede tenerse en cuenta la estatura.

Sin embargo, estos dos parámetros, aunque forman parte del “tamaño”, no son equivalentes y su distinción es clave para el análisis adaptativo. La masa corporal es, por definición, una medida de la inercia. Es, por tanto, una magnitud física y escalar que mide la resistencia de un cuerpo al cambio de velocidad o posición cuando se le aplica una fuerza; es decir, mide la cantidad de inercia (Britannica, T. Editors of Encyclopaedia, 2023).

La masa corporal ha sido y es vista como un parámetro relativamente sencillo de medir en seres vivos, ya que solo requiere el uso de una báscula. Por ello, puede considerarse como el tamaño puro y es el más utilizado para analizar otros parámetros biológicos más complejos. La masa corporal se erige como el predictor más útil para interpretar la adaptación de las especies a su medio. Su uso es extensivo en el campo de la morfología funcional y la evolución de las proporciones corporales, especialmente en especies extintas (Damuth y MacFadden, 1990). Este parámetro es, sin embargo, muy complicado de calcular en especies fósiles como veremos enseguida.

Por otro lado, la estatura puede ser considerada una variable de tamaño, pero también de forma corporal. La estatura está, en gran parte, determinada genéticamente (Preece, 2008; Ruff, 2002), lo que le permite proporcionar información valiosa sobre el perfil biológico de un individuo (Carretero *et al.*, 2012; Christensen *et al.*, 2019). Pero, también tiene un componente ambiental muy fuerte que es el que da información sobre la salud y la nutrición de un individuo durante su desarrollo (Silventoinen, 2003). Debido a su estabilidad una vez alcanzada la madurez y su relativa facilidad a la hora de ser estimada, la estatura puede ser, y es, utilizada como parámetro para el reconocimiento de un individuo en contextos forenses (De Mendonça, 2000) y puede ser considerado un buen estimador del estado de salud del individuo durante el desarrollo (Cardoso, 2009).

Finalmente hay que tener en cuenta la relación superficie/volumen, que puede ser tomada también como la relación entre la masa corporal y la estatura. Este es un factor que tiene una gran importancia a nivel ecológico y adaptativo, especialmente para la termorregulación y la eficiencia metabólica y por tanto de la energía necesaria para la supervivencia. En este sentido, Ruff (1991) demuestra que, en el ser humano, lo que más aporta en ese cociente es la anchura corporal y no la estatura (**Fig. 4**).



Área Lateral:	$\pi D L$	$\pi D 2L$
Volumen (masa):	$\pi/4 D^2 L$	$\pi/4 D^2 2L$
Área/masa:	$4/D$	$4/D$

Figura 4. Relación superficie volumen. Modificado de Ruff (1991).

El Desafío de la estimación en fósiles humanos

La importancia del cálculo del tamaño corporal se refleja en la gran cantidad de literatura científica dedicada al tema. Solo en los últimos 10 años (2015-2025), una búsqueda en inglés en Google Scholar sobre la estimación y la variabilidad de la estatura en el ser humano actual arroja 59.900 trabajos (“stature” or “height” and “human”), cifra que se reduce a 1.210 al especificar homínidos (“stature” or “height” and “hominins”). Respecto al concepto de masa corporal, los trabajos llegan a 49.500 (“body size” or “body mass” and “human”) y 2.300 si especificamos homínidos (“body size” or “body mass” and “hominins”).

A pesar de esta gran cantidad de esfuerzo por parte del mundo científico, el cálculo de la masa corporal (tomado como sustituto del concepto tamaño corporal) de una especie tiene multitud de problemas a la hora de realizar análisis en especies fósiles.

Puede que, de todos ellos, el más importante sea que la masa corporal ha de ser estimada a través de restos óseos que no tienen por qué ser los que mejor correlación tengan con el tamaño corporal total (Damuth y MacFadden, 1990). Además, los restos fósiles son escasos, no siempre están completos, no tienen por qué ser la parte del cuerpo más informativa ni pertenecer al ejemplar ideal repre-

sentativo de la especie que queremos describir. Para estimar la masa corporal, es fundamental tener en cuenta el sexo del individuo, parámetro que tampoco es sencillo de determinar desde los restos fósiles. Esta determinación sexual previa es necesaria ya que la composición corporal es distinta, con los varones con más músculo que las mujeres y las mujeres con más grasa que los varones lo que lleva a estimaciones de peso distintas entre varones y mujeres con los mismos parámetros osteométricos. Las fórmulas de estimación de peso y estatura, por tanto, tienen en cuenta este problema y ofrecen una expresión diferente para ambos sexos (Auerbach y Ruff, 2004; Ruff *et al.*, 1997).

Aunque es cierto que, en los grandes primates el porcentaje de hueso es muy constante alrededor de un 13-14 % en gorilas, orangutanes, chimpancés y humanos modernos (Clarys *et al.*, 1999; Grand, 1990; Zilhman y Bolter, 2015; Carretero *et al.*, 2018), el componente dominante de los grandes tejidos (piel, músculos, hueso y grasa) puede variar también entre especies, igual que (ya lo hemos dicho antes) entre sexos. Es decir, con el mismo peso corporal, la proporción de los tejidos puede no ser la misma. El porcentaje de la masa muscular, no es la misma entre primates no humanos y los humanos y no están tampoco igualmente repartidos por el cuerpo. Por ejemplo, los chimpancés tienen más músculo que los humanos modernos, pero además lo tienen más desarrollado en la parte superior del cuerpo, mientras que los humanos tenemos la mayor parte de nuestro músculo en la parte inferior del cuerpo (Zilhman y Bolter, 2015). Hay que tener en cuenta además que, en condiciones de salud, la cantidad de masa muscular correlaciona con la masa ósea en cada especie, sin embargo, en condiciones extremas, el músculo se pierde (por enfermedad o por inmovilidad) y se gana (con ejercicio físico y nutrición adecuada) mucho más rápidamente que el hueso. Por tanto, el peso del esqueleto por sí mismo no reflejaría exactamente el tamaño corporal en todas las especies ni en todas ocasiones, aunque sí que se podría utilizar en condiciones de salud óptimas.

Puede que te sorprendas si te digo que la mayor diferencia entre los primates no humanos y los humanos modernos se encuentra en el porcentaje de grasa y en el grosor de la piel (Zilhman y Bolter, 2015). El ser humano se puede considerar una especie con grasa en comparación con otras especies de mamíferos, incluidas todas las de los primates no humanos (Wells, 2010; Zilhman y Bolter, 2015). Esto tiene sus ventajas, ya que la grasa es un almacén energético y tiene un papel crucial en la reproducción tanto en las hembras de gorilas, orangutanes, chimpancés como en *Homo sapiens* (Zilhman y Bolter, 2015), pero también, y aquí puede que esté la diferencia, en los recién nacidos, siendo los de humano modernos unos bebés que podemos definir como gorditos (Kuzawa, 1998). De hecho, una bajada excesiva de grasa en atletas puede llevar a una falta temporal de la secreción de espermatozoides o a la menstruación (Wells, 2010), y un recién nacido prematuro estaría perfectamente formado, pero sin esa grasa que le da esa imagen de salud. ¿Cuándo empieza el ser humano a tener tanta grasa corporal? Este es otro de los grandes misterios de la paleoantropología.

Por todo esto, la estimación del peso corporal de los mamíferos en general, pero de los homínidos en particular, está plagada de dificultades. La elección de los métodos, de las variables apropiadas y su error asociado (que puede ser grande o, peor, desconocido), la elección de las muestras de referencia, junto con el problema de la fragmentación de los restos, complican enormemente la tarea (Aiello y Wood, 1994; Auerbach y Ruff, 2004; Feldesman y Fountain, 1996; Feldesman y Lundy, 1988; Jungers, 1988; Smith *et al.*, 1996).

En paleoantropología, la especie que se suele usar como comparativa es la nuestra, *Homo sapiens*, una especie que es extremadamente variable en peso y en estatura. Encontramos individuos pequeños y ligeros como los pigmeos, y otros más grandes y pesados como los europeos, y en la que la variación en el peso global puede llegar al 50 % (Ruff, 2002). Mientras que la variación en estatura es alrededor de un 10 % y no sigue una tendencia geográfica, la anchura corporal (que está ligada al volumen y la masa) tiene un cambio mayor (25 %) y sí que sigue un gradiente latitudinal (Ruff, 2002).

A esto se suman las fluctuaciones temporales a corto o largo plazo. Por ejemplo, la masa corporal es un parámetro que fluctúa a lo largo del día, siempre pesaremos más al final del día que al principio, debido a la cantidad de agua que se nos acumula en el cuerpo. Si vamos a un periodo de tiempo y de espacio más amplio, los problemas de hambruna, dieta o de sobrealimentación son factores importantes, llevando a problemas de sobrepeso/obesidad o desnutrición en distintos países del mundo con una variación de peso (ganancia o pérdida) importante.

Otro factor muy importante es la edad, ni el peso corporal ni la composición corporal son iguales en un individuo en crecimiento, en uno que ha dejado de crecer recientemente, en un individuo maduro o en uno anciano (Abraham *et al.*, 1979; Shepard, 1991). De hecho, las fórmulas desarrolladas por Ruff y colaboradores (Ruff *et al.*, 1991) para humanos modernos, muestran que la cabeza femoral tiene una mayor relación con el peso del individuo a los 18 años (la edad tomada para alcanzar el estado de adulto), mientras que las secciones transversales del fémur (tomadas aproximadamente al 80 %) tienen una mayor correlación con el peso del individuo en el momento de la muerte. En este sentido, Shepard (1991) afirma que el peso más semejante al peso ideal (la masa que un individuo debe tener para maximizar la esperanza de vida) se alcanza en la etapa de adulto joven.

El consenso científico: La extremidad inferior

A pesar de todas estas limitaciones, la estimación de la masa corporal en los restos humanos sigue jugando un papel principal en la investigación sobre evolución humana, pero también en los campos de la antropología biológica y la forense. Hay un consenso generalizado en que el esqueleto postcranial tiene una mayor relación con el tamaño general, y la extremidad inferior es la preferida por los autores.

Dado que los homínidos y los humanos modernos son bípedos, sus extremidades inferiores han de ser capaces de soportar todo el peso corporal en condiciones estáticas, pero también en movimiento (Grabowski *et al.*, 2015). Es por esto que los huesos que conforman la extremidad inferior han de estar adaptados a soportarlo. El tamaño de las articulaciones y las secciones transversales de los huesos, han de ser las adecuadas para resistir el peso corporal, y por tanto las ecuaciones construidas con estas variables son las más precisas y exactas que se pueden obtener (Jungers, 1988; McHenry, 1992; Porter, 2002; Ruff, 1990; Ruff *et al.*, 1991, 1997; Trinkaus y Ruff, 2012, Ruff *et al.*, 2018). Y esto nos lleva de nuevo al principio, el dilema de la elección de las variables y de unas buenas fórmulas para el cálculo de la estatura y peso adecuados es el principal problema, tanto para los investigadores al reconstruir la ecología de especies extintas, como para los investigadores que se dediquen a nuestra propia especie al comparar incluso los valores de los pacientes con las tablas de peso medio o peso ideal (Shepard, 1991). Un factor más a tener en cuenta es que llamamos peso ideal, pero eso es otra cosa, como ya dijimos en el apartado anterior.

Cálculo de la masa corporal: Regresión lineal

La regresión lineal es un método estadístico para predecir el valor de una variable dependiente continua en función de una o más variables independientes creando lo que se llama una ecuación o fórmula de regresión (**Fig. 5**). En toda regresión existe un error que es la distancia entre el valor de la variable dependiente real y la estimada (a través de esa recta de regresión) y que es mayor cuanto más pequeño es el coeficiente de correlación (r). La mayor parte de las estimaciones de la masa corporal se realizan a través de regresión lineal por mínimos cuadrados (OLS). Este tipo de análisis es muy sensible a que el espécimen problema tenga una variable independiente (la medición del hueso, variable X) lo más parecida posible a la muestra problema desde la que se crea la recta de regresión. Por esta razón, Olivier (1976), en su estudio clásico para el cálculo de las estaturas en *Australopithecus*, tuvo la precaución de utilizar pigmeos como muestra de comparativa para que su tamaño corporal fuera el más parecido posible al de la especie a estudiar.

En relación a la estimación del peso corporal, el trabajo de McHenry (1992) es pionero y uno de los más completos. Incorporó restos de simios para calcular el peso de los primeros homínidos y desarrolló fórmulas con la media del peso de las especies de *Australopithecus*. McHenry observó que el cálculo del peso corporal a través de los restos óseos sigue una relación alométrica que depende, además, del hueso específico que se mida, es decir, de qué parte del cuerpo creamos la variable independiente.

Un estudio posterior (Auerbach y Ruff, 2004) analizó y combinó este trabajo con los de Ruff *et al.* (1997) y Grine *et al.* (1995), realizando una comprobación para ver qué fórmula (en la que la variable independiente es el diámetro de la cabeza femoral o la anchura biilíaca de la pelvis) obtenía mejores resultados.

El estudio demostró que la precisión de las fórmulas depende directamente del tamaño del individuo que se esté estimando y que debe ser similar (o lo más cercano posible) a la media del tamaño corporal de la población que está creando la recta de regresión. Esta última precaución fue reiterada por Trinkaus y Ruff (2012) y Ruff *et al.* (2018), quienes utilizaron únicamente una fórmula determinada dependiendo del tamaño específico de la cabeza femoral del individuo.

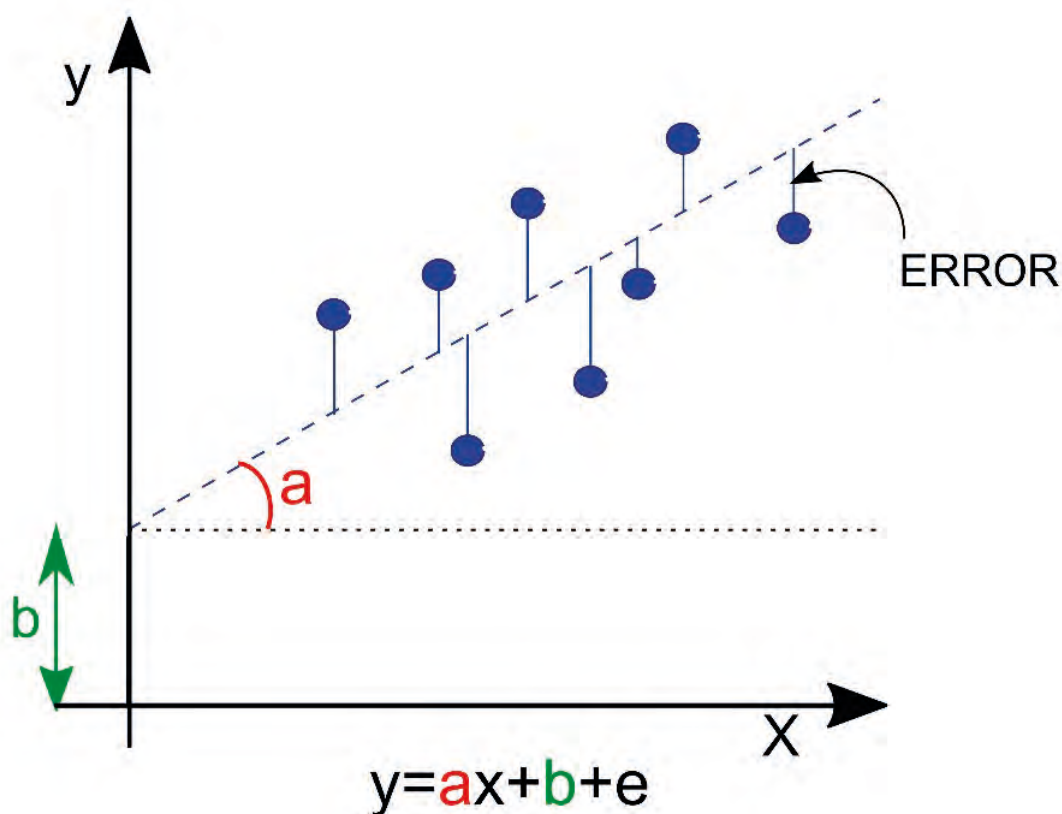


Figura 5. Regresión lineal. Elaboración propia. Y es la variable dependiente, x la variable independiente, a es la pendiente de la recta, b es ordenada en el origen y e es el error medio de la regresión.

Un ejemplo en el registro fósil

Con todo esto, la especie *Homo neanderthalensis* y la población preneandertal de la Sima de los Huesos (Atapuerca, Burgos), son los grupos fósiles mejor conocidos a excepción de nuestra propia especie.

El trabajo realizado por Arsuaga y colaboradores (Arsuaga *et al.*, 2014, 2015), analizan tanto el tamaño corporal como el grado de encefalización de estos humanos y lo comparan con nosotros. En este trabajo, los investigadores confirman que los neandertales y los humanos de la Sima de los Huesos son más pesados que la especie humana actual. Además, por el trabajo de (Carretero *et al.*, 2012)

sabemos que los neandertales son más bajos (166,7 cm para varones y 154,5 cm para mujeres) que los humanos de la Sima de los Huesos (169,5 cm para varones y 157,7 cm para mujeres), sin embargo los primeros humanos modernos son los más altos (188,5 cm para varones y 169,8 cm para mujeres). Otra cosa es el peso corporal, los neandertales están en los 72 kilos de peso de media, mientras que la Sima ronda los 69 kilos y los humanos modernos a nivel mundial es de 62 kilos.

Por otro lado, el coeficiente de encefalización se comparte en humanos modernos y neandertales, con alrededor de 3,90, mientras que la Sima de los Huesos, con cerebros un poco más pequeños, poseen una encefalización de 3,50.

Todo esto tiene influencia en la biología de estas especies, que tiene su reflejo en el desarrollo de sus bebés y en su capacidad reproductiva, cerebros grandes, cuerpos grandes y musculosos, es decir, alto requerimiento energético. Esto en un momento, al menos para los neandertales, en el que el clima se acerca al último máximo glacial en el que los humanos anatómicamente modernos llegamos a Europa, más gráciles, con menos requerimientos energéticos poseíamos una ventaja evolutiva importante respecto a ellos que nos ha permitido adaptarnos a un clima europeo lleno de cambios estacionales y con pocos recursos alimenticios.

Conclusión

La estimación del tamaño corporal es un cálculo primordial para el estudio de las especies actuales, pero también de las fósiles permitiendo en estas últimas llegar a ser el parámetro que permita conocer otros parámetros biológicos que de otra manera serían invisibles para la ciencia. En todas ellas y por supuesto en las especies humanas pasadas es un parámetro crítico para saber cómo eran, qué necesidades tenían y, por tanto, qué relación tenían con el medio ambiente.

Bibliografía

- Abraham, S., Johnson, C. L., & Najjar, M. F. 1979. Weight and height of adults 18-74 years of age, United States, 1971-74 (No. 211). Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Office of Health Research, Statistics, and Technology, National Center for Health Statistic.
- Aiello, L. C., & Wood, B. A. 1994. Cranial variables as predictors of hominine body mass. *American Journal of Physical Anthropology*, 95(4), 409-426. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330950405>
- Arsuaga, J. L., Carretero, J. M., Lorenzo, C., Gomez-Olivencia, A., Pablos, A., Rodriguez, L., Garcia-Gonzalez, R., Bonmati, A., Quam, R., Pantoja-Perez, A., Martinez, I., Aranburu, A., Gracia-Tellez, A., Poza-Rey, E., Sala, N., García, N., Alcazar de Velasco, A., Cuenca-Bescós, G., Bermudez de Castro, J. M., & Carbonell, E. 2015. Postcranial morphology of the middle Pleistocene humans from Sima de los Huesos, Spain. *PNAS*, 112(37), 11524-11529. <https://doi.org/10.1073/pnas.1514828112>

- Arsuaga, J. L., Martínez, I., Arnold, L. J., Aranburu, A., Gracia-Tellez, A., Sharp, W. D., Quam, R., Falgueres, C., Pantoja-Perez, A., Bischoff, J., Poza-Rey, E., Parés, J. M., Carretero, J. M., Demuro, M., Lorenzo, C., Sala, N., Martín-Torres, M., García, N., Alcazar de Velasco, A., Cuenca-Bescós, G., Gómez-Olivencia, A., Moreno, D., Pablos, A., Shen, C.-C., Rodríguez, L., Ortega Martinez, A. I., García, R., Bonmati, A., Bermúdez de Castro, J. M., Carbonell, E. 2014. Neandertal roots: Cranial and chronological evidence from Sima de los Huesos. *Science* 344, 1358–1363. <https://doi.org/10.1126/science.1253958>
- Auerbach, B. M., & Ruff, C. 2004. Human Body Mass Estimation: A comparison of «Morphometric» and «Mechanical» Methods. *American Journal of Physical Anthropology*, 125, 331-342.
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. 2023. Mass. En Encyclopedia Britannica.
- Calder, W. A. 1996. Size, function, and life history. Courier Corporation.
- Cardoso, H.F.V., Gomes, J.E.A., 2009. Trends in adult stature of peoples who inhabited the modern Portuguese territory from the Mesolithic to the late 20th century. *International Journal of Osteoarchaeology* 19, 711–725. <https://doi.org/10.1002/oa.991>
- Carretero, J. M., Rodríguez, L., García-González, R., Arsuaga, J. L., Gómez-Olivencia, A., Lorenzo, C., Bonmatí, A., Gracia, A., Martínez, I., & Quam, R. 2012. Stature estimation from complete long bones in the Middle Pleistocene humans from the Sima de los Huesos, Sierra de Atapuerca (Spain). *Journal of Human Evolution*, 62(2), 242-255.
- Carretero, J. M., Rodriguez, L., García-González, R., Quam, R., & Arsuaga, J. L. 2018. Exploring bone volume and skeletal weight in the Middle Pleistocene humans from the Sima de los Huesos site (Sierra de Atapuerca, Spain). *Journal of Anatomy*. <https://doi.org/10.1111/joa.12886>
- Charnov, E. L., & Berrigan, D. 1993. Why do female primates have such long lifespans and so few babies? Or life in the slow lane. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 1, 191-194.
- Christensen, A. M., Passalacqua, N., & Bartelink, E. J. 2019. Forensic Anthropology: Current Methods and Practice (Second). Academic Press.
- Clarys, J. P., Martin, A. D., Marfell-Jones, M. J., Janssens, V., Caboor, D., & Drinkwater, D. T. 1999. Human Body Composition; A review of Adult Dissection Data. *American Journal of Human Biology*, 11, 167-174.
- Damuth, J. 1981. Population density and body size in mammals. *Nature*, 290(5808), 699-700. <https://doi.org/10.1038/290699a0>
- Damuth, J., & MacFadden, B. J. 1990. Body Size in Mammalian Paleobiology: Estimation and Biological Implications. Cambridge University Press.

- De Mendonça, M. C. 2000. Estimation of height from the length of long bones in a Portuguese adult population. *American Journal of Physical Anthropology*, 112, 39-48.
- Eisenberg, J. F. 1990. The behavioral/ecological significance of body size in Mammalia. En *Body Size in Mammalian Paleobiology* (Damuth, J; MacFadden, B.J). Cambridge University Press.
- Feldesman, M. R., & Fountain, R. L. 1996. Race Specific and the Femur/Stature Ratio. *American Journal of Physical Anthropology*, 100, 207-224.
- Feldesman, M. R., & Lundy, J. K. 1988. Stature estimates for some African Plio-Pleistocene fossils hominids. *Journal of Human Evolution*, 17, 583-596.
- Foley, R. A., Lee, P. C., Widdowson, E. M., Knight, C. D., Jonxis, J. H. P., & Bone, Q. 1997. Ecology and energetics of encephalization in hominid evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 334(1270), 223-232. <https://doi.org/10.1098/rstb.1991.0111>
- Grabowski, M., Hatala, K. G., Jungers, W. L., & Richmond, B. G. 2015. Body mass estimates of hominin fossils and the evolution of human body size. *Journal of Human Evolution*, 85, 75-93. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2015.05.005>
- Grand, T. I. 1990. The functional anatomy of body mass. En *Body Size in Mammalian Paleobiology* (Damuth, J&MacFadden, B.J, pp. 39-48). Cambridge University Press.
- Grine, F. E., Jungers, W. L., Tobias, P. V., & Pearson, O. M. 1995. Fossil Homo Femur from Berg Aukas, Northern Namibia. *American Journal of Physical Anthropology*, 97, 151-185.
- Harvey, P. H., & Clutton-Brock, T. H. 1985. LIFE HISTORY VARIATION IN PRIMATES. *Evolution*, 39(3), 559-581. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1985.tb00395.x>
- Jungers, W. L. 1988. Relative joint size and hominoid locomotor adaptations with implications for the evolution of hominid bipedalism. *Journal of Human Evolution*, 17, 247-265.
- Jungers, W. L. 1990. Problems and methods in reconstructing body size in fossil primates. En *Body Size in Mammalian Paleobiology: Estimation and Biological Implications* (Damuth, J&MacFadden, B.J, pp. 103-118). Cambridge University Press.
- Kuzawa, C.W., 1998. Adipose tissue in human infancy and childhood: An evolutionary perspective. *American Journal of Physical Anthropology* 107, 177-209. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(1998\)107:27+%253C177::AID-AJPA7%253E3.O.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(1998)107:27+%253C177::AID-AJPA7%253E3.O.CO;2-B)
- Leutenegger, W., & Kelly, J. T. 1977. Relationship of sexual dimorphism in canine size and body size to social, behavioral, and ecological correlates in anthropoid primates. *Primates*, 18(1), 117-136. <https://doi.org/10.1007/BF02382954>
- Martin, R. D. 1990. *Primate origins and evolution*. Univ. Press, Princeton.

- McHenry, H. M. 1992. Body Size and Proportions in Early Hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 87, 407-431.
- McNab, B. K. 1990. The physiological significance of body size. En J. Damuth & B. J. MacFadden (Eds.), *Body Size in Mammalian Paleobiology: Estimation and Biological Implications* (pp. 11-23). Cambridge Academic Press.
- Monroe, M. J., & Bokma, F. 2010. Short communication: Little evidence for Cope's rule from Bayesian phylogenetic analysis of extant mammals. *Journal of Evolutionary Biology*, 23(9), 2017-2021. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2010.02051.x>
- Olivier, G. 1976. The Stature of Australopithecines. *Journal of Human Evolution*, 5, 529-534.
- Pélabon, C., Firmat, C., Bolstad, G. H., Voje, K. L., Houle, D., Cassara, J., Rouzic, A. L., & Hansen, T. F. 2014. Evolution of morphological allometry. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1320(1), 58-75. <https://doi.org/10.1111/nyas.12470>
- Porter, A. M. W. 2002. Estimation of body size and physique from hominin skeletal remains. *Homo- Journal of Comparative Human Biology*, 53(1), 17-38.
- Prado-Nóvoa, O., Howard, K. R., Laskaridou, E., Reid, G. R., Zorrilla-Revilla, G., Marinik, E. L., Davy, B. M., Speakman, J. R., & Davy, K. P. 2023. Validation of predictive equations to estimate resting metabolic rate of females and males across different activity levels. *American Journal of Human Biology*, n/a(n/a), e24005. <https://doi.org/10.1002/ajhb.24005>
- Preece, M. A. 2008. The Genetic Contribution to Stature. *Hormone Research*, 45(Suppl. 2), 56-58. <https://doi.org/10.1159/000184849>
- Raichle, M.E., Gusnard, D.A. 2002. Appraising the brain's energy budget. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, 10237-10239. <https://doi.org/10.1073/pnas.172399499>
- Ruff, C. 1987. Sexual dimorphism in human lower limb bone structure: Relationship to subsistence strategy and sexual division of labor. *Journal of Human Evolution*, 16, 391-416.
- Ruff, C. B. 1990. Hindlimb bone allometry in anthropoid primates. En *Body Size in Mammalian Paleobiology: Estimation and Biological Implications* (Damuth, J&MacFadden, B.J, pp. 103-118). Cambridge University Press.
- Ruff, C., 1991. Climate and body shape in hominid evolution. *Journal of Human Evolution* 21, 81-105.
- Ruff, C. 2002. Variation in Human Body Size and Shape. *Annual Review of Anthropology*, 31(1), 211-232. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.31.040402.085407>
- Ruff, C. B., Burgess, M. L., Squyres, N., Junno, J.-A., & Trinkaus, E. 2018. Lower limb articular scaling and body mass estimation in Pliocene and Pleistocene hominins. *Body Mass Estimation: Methodological Issues and Fossil Applications*, 115, 85-111. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2017.10.014>

- Ruff, C. B., Scott, W. W., & Liu, A. Y. 1991. Articular and diaphyseal remodeling of the proximal femur with changes in body mass in adults. *American Journal of Physical Anthropology*, 86, 397-413.
- Ruff, C. B., Trinkaus, E., & Holliday, T. W. 1997. Body mass and encephalization in Pleistocene *Homo*. *Nature*, 387, 173-176.
- Shepard, R. J. 1991. *Body Composition in Biological Anthropology*. Cambridge University Press.
- Silventoinen, K. 2003. Determinants of variation in adult body height. *Journal of Biosocial Science*, 35(2), 263-285. Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/S0021932003002633>
- Smith, R.J., Albrecht, G.H., Damuth, J., Di Bacco, M., Fortelius, M., Gingerich, P.D., Godfrey, L.R., Sutherland, M.R., Jungers, W.L., Leigh, S.R., Leney, M.D., Foley, R.A., Leonard, W.R., Robertson, M.L., Leutenegger, W., McHenry, H.M., Martin, R.D., Pilbeam, D., Plavcan, J.M., Wheeler, P.E., Wood, B.A., Collard, M. 1996. Biology and Body Size in Human Evolution: Statistical Inference Misapplied [and Comments and Reply]. *Current Anthropology* 37, 451-481. <https://doi.org/10.1086/204505>
- Trinkaus, E., & Ruff, C. B. 2012. Femoral and Tibial Diaphyseal Cross-sectional Geometry in Pleistocene *Homo*. *PaleoAnthropology*, 2012, 13-62.
- Wells, J. C. K. 2010. *The evolutionary biology of human body fatness*. Cambridge University Press.
- White, C. R., & Seymour, R. S. 2003. Mammalian basal metabolic rate is proportional to body mass^{2/3}. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(7), 4046-4049. <https://doi.org/10.1073/pnas.0436428100>
- Zilhman, A., & Bolter, D. 2015. Body composition in *Pan paniscus* compared with *Homo sapiens* has implications for changes during human evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24), 7466-7471. <https://doi.org/10.1073/pnas.1505071112>

¿Por qué las paredes celulares de las plantas son importantes en la resistencia frente a patógenos?

Asier Largo Gosens

Área de Fisiología Vegetal. Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad de León.

Instituto de Biología Molecular, Genómica y Proteómica (INBIOMIC), Universidad de León.

alargs@unileon.es

Resumen

La pared celular vegetal es una estructura dinámica esencial para el crecimiento, la morfogénesis y la defensa de las plantas frente a patógenos. Entre sus componentes, las pectinas —especialmente el homogalacturonano— desempeñan un papel crucial en la resistencia, ya que su grado de metilesterificación determina la rigidez, adhesión y permeabilidad de la pared. Este proceso está regulado por las pectin metilesterasas (PMEs) y sus inhibidores (PMEIs), cuya interacción modula tanto la arquitectura de la pared como las respuestas de defensa de la planta frente a patógenos.

Muchos fitopatógenos, como *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*, secretan enzimas capaces de degradar las pectinas para facilitar la infección, mientras que las plantas detectan los fragmentos liberados (oligogalacturónidos) como señales que activan su inmunidad. Por tanto, la pared celular es una estructura clave en el control del avance de fitopatógenos, no solo porque actúa como una primera barrera de defensa, sino porque es un reservorio de moléculas que pueden ser percibidas por la planta para generar respuestas de defensa. Por tanto, el estudio de cómo la pared celular de las plantas contribuye a estos procesos es clave para el desarrollo de variedades de plantas resistentes a enfermedades y para el desarrollo de nuevos tratamientos que sean más sostenibles con el medio ambiente.

Palabras clave:

Defensa de plantas, homogalacturonano, inmunidad innata, metilesterificación, pared celular, pectinas, resistencia a fitopatógenos.

Introducción: la pared celular de las plantas

La pared celular de las plantas es una estructura que rodea el protoplasto de la célula vegetal, siendo un compartimento clave para la viabilidad celular, la elongación y el tamaño final de la célula y el control de multitud de procesos durante la morfogénesis de la planta (Fuertes-Rabanal *et al.*, 2025). Por tanto,

las paredes celulares actúan como los “escultores” de la forma final de la planta, la cual se determina en respuesta tanto a señales del desarrollo como a factores externos, tanto bióticos como abióticos (Delmer *et al.*, 2024).

Desde la primera observación de las paredes celulares de corcho, realizada gracias a los avances en microscopía de Robert Hooke (1665), se han logrado importantes progresos tanto en la descripción de la composición y la arquitectura de esta estructura, como en el esclarecimiento de si las modificaciones en la pared celular afectan al desarrollo de las plantas y/o a las respuestas de estas frente a cambios ambientales (Delmer *et al.*, 2024). Sin embargo, aún persisten numerosas incógnitas sin resolver en torno a la pared celular de las plantas (McFarlane, 2023; Boerjan *et al.*, 2024). El mayor número de limitaciones que nos encontramos a la hora de estudiar la pared celular tiene que ver con la gran diversidad en composición y arquitectura de esta estructura. Como se puede observar en secciones de tallo de una planta relativamente sencilla, como es *Arabidopsis thaliana*, la diversidad en tamaño de las células y en el grosor (y por tanto en composición) de las paredes de los diferentes tipos celulares es muy perceptible (**Fig. 1A y B**). Además, las paredes celulares son compartimentos metabólicamente muy activos, por lo que sufren continuos cambios que pueden ser tanto globales como locales, siendo estos últimos muy difíciles de detectar con las tecnologías actuales (Boerjan *et al.*, 2024).

En plantas vasculares, durante el proceso de citocinesis se va a depositar el fragmoplasto en el centro de la célula que va a dar lugar a la formación de la lámina media una vez se divida en dos células hijas (Fuertes-Rabanal *et al.*, 2025) (**Fig. 1C**). Tras este proceso, todas las células van a sintetizar, hacia el interior, la pared celular primaria y ciertas células con especialización funcional, como las células del xilema o de las fibras interfasciculares, van a depositar una capa muy engrosada denominada pared celular secundaria (Fuertes-Rabanal *et al.*, 2025) (**Fig. 1C**). En angiospermas, las plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas poseen paredes celulares con diferencias sustanciales en términos de composición (Fuertes-Rabanal *et al.*, 2025). Nos vamos a centrar en las paredes celulares primarias de dicotiledóneas, dado que son las que poseen todas las células de las plantas sujetas a estudio en este trabajo.

Las plantas dicotiledóneas poseen paredes celulares primarias “tipo I” que se caracterizan por estar compuestas fundamentalmente de polisacáridos con una pequeña cantidad de glicoproteínas (Fuertes-Rabanal *et al.*, 2025). Los polisacáridos se dividen en microfibrillas de celulosa, hemicelulosas y pectinas que generan una red fibrilar mediante diferentes interacciones intra e intermoleculares (Fuertes-Rabanal *et al.*, 2025) (**Fig. 1D y E**). Dependiendo de la cantidad de polisacáridos y de sus interacciones se van generar arquitecturas muy diversas, por este motivo, los “paredólogos” hemos tratado de generar diferentes modelos simplificados de esta estructura que expliquen del modo más preciso las propiedades físico-químicas de la pared celular como el representado en la modelización 3D en la **Figura 1F** (Cosgrove *et al.*, 2022; Boerjan *et al.*, 2024).

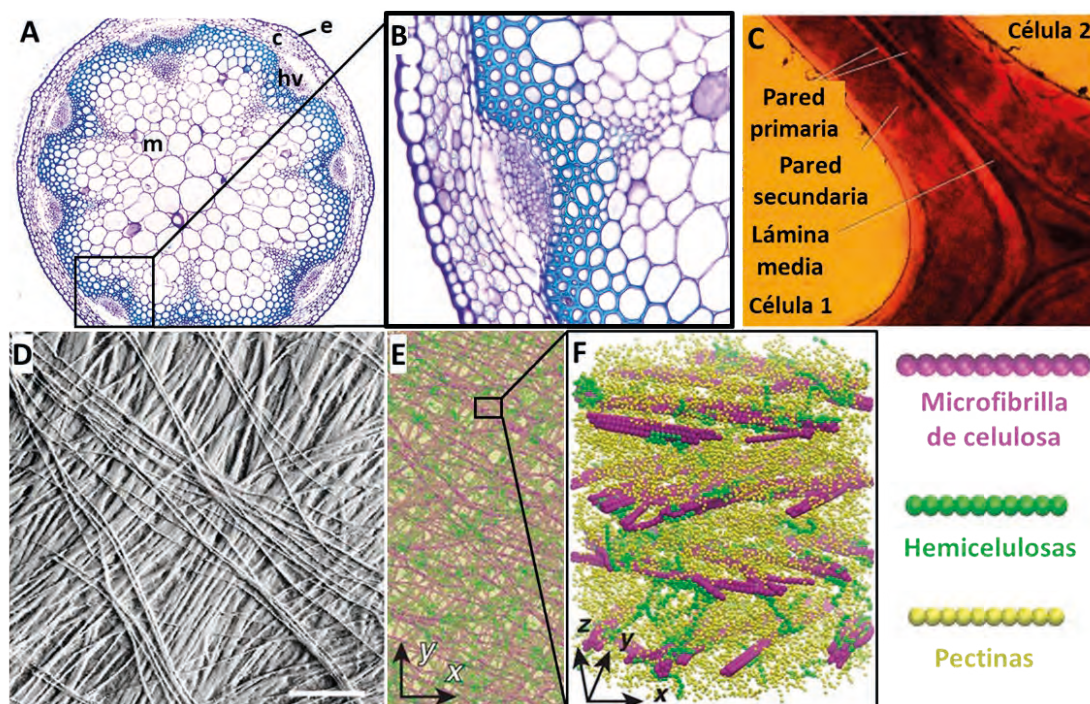


Figura 1. La pared celular de plantas y modelo 3D con sus componentes principales. **A)** Sección de tallo floral de *Arabidopsis thaliana* teñido con azul de toluidina que tiñe de color azul células que poseen pared celular secundaria (más gruesa) y en lila células que sólo depositan pared celular primaria (más fina). Epidermis, e; corteza, c, haces vasculares, hv; médula, m. **B)** Detalle del corte de tallo de *A. thaliana* donde se pueden observar las diferentes paredes celulares. **C)** Imagen de microscopía electrónica de transmisión donde se observan las diferentes capas de pared celular que separan dos células vecinas: la lámina media, la pared celular primaria y la pared celular secundaria. **D)** Imagen de microscopía de fuerza atómica en la que se observa la superficie de la pared celular y la deposición de microfibrillas de celulosa que generan varias capas cruzadas entre sí. Modelización 2D de la superficie **E)** y 3D de la pared celular primaria **F)** con sus componentes principales. Las imágenes A y B son de elaboración propia, la imagen C es de acceso libre, las imágenes D, E y F han sido tomadas de Zhang *et al.* (2021).

Las pectinas modulan las propiedades clave de la pared celular

Como se puede observar en el modelo (**Fig. 1F**), las pectinas constituyen el 30-40 % del componente polisacárido de las paredes celulares primarias tipo I, aunque esta proporción puede estar por encima del 50 % en paredes de determinadas frutas (Mohnen, 2008). Las pectinas son polisacáridos ácidos de composición muy diversa en monosacáridos y tradicionalmente se han dividido en diferentes dominios con una característica común: poseen altas cantidades de ácido galacturónico (Fuertes-Rabanal *et al.*, 2025) (**Fig. 2**). Los dominios más comunes en dicotiledóneas son el homogalacturonano, el ramnogalacturonano I, el ramnogalacturonano II y el xilogalacturonano (Mohnen, 2008) (**Fig. 2**).

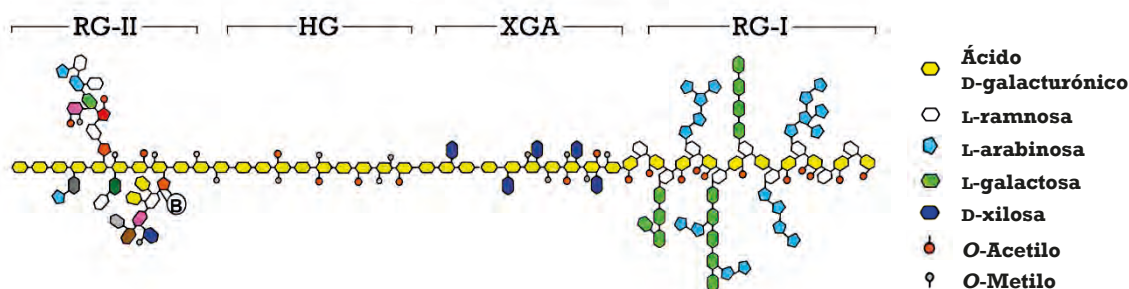


Figura 2. Representación esquemática de los diferentes dominios de pectinas con sus monosacáridos principales. Las pectinas se dividen en 4 dominios principales: ramnogalacturonano II (RG-II), homogalacturonano (HG), xilogalacturonano (XGA) y ramnogalacturonano I (RG-I). La cadena principal de los dominios de pectina está formada fundamentalmente por residuos de ácido galacturónico. Cada dominio tiene diferentes sustituciones o cadenas laterales (Gómez de Agüero y Largo-Gosens, 2024).

Dada su alta proporción, su gran diversidad y su alta afinidad por el agua, las pectinas desempeñan papeles clave en las propiedades de la pared celular como la capacidad de retención de agua, las propiedades mecánicas y la permeabilidad de esta estructura (Levesque-Tremblay *et al.*, 2015; Coculo y Lionetti, 2022). Estas propiedades van a determinar la capacidad de elongación y adhesión celular, la comunicación intercelular y las respuestas de las plantas a factores bióticos y abióticos (Levesque-Tremblay *et al.*, 2015; Coculo y Lionetti, 2022).

De entre los dominios de pectinas, el más abundante y sencillo a nivel estructural es el homogalacturonano (Mohnen, 2008) (**Fig. 2**). Este polímero está compuesto únicamente por una cadena principal de ácido galacturónico que puede estar metilesterificado en el carbono 6 y/o acetilesterificado en los carbonos 2 y 3 (Mohnen, 2008). El homogalacturonano se sintetiza en el aparato de Golgi, tras la acción de glicosiltransferasas, metiltransferasas y acetiltransferasas, y posteriormente va a ser depositado en el apoplasto (Mohnen, 2008). Aunque la estructura de este polisacárido sea relativamente sencilla, dado que sólo se compone de un monosacárido, el control de su grado de metilesterificación y acetilesterificación es un proceso clave durante el desarrollo de la planta y en respuestas a factores exógenos (Levesque-Tremblay *et al.*, 2015; Coculo y Lionetti, 2022). Esto ha sido ampliamente demostrado mediante el estudio de mutantes que afectan la expresión de pectin metiltransferasas, como QUASIMODO2, y pectin acetiltransferasas, como POAT, que muestran severos defectos en la adhesión celular lo que afecta al desarrollo de las plantas (Verger *et al.*, 2016; Lorrai *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2024) (**Fig. 3**). En el caso de QUASIMODO2, el mutante *qua2-1* también mostró una mayor susceptibilidad al hongo necrótrofo *Botrytis cinerea*, lo que indica que el control de la metilesterificación del homogalacturonano es clave para las respuestas de defensa de las plantas frente a patógenos (Lorrai *et al.*, 2021) (**Fig. 3C**).

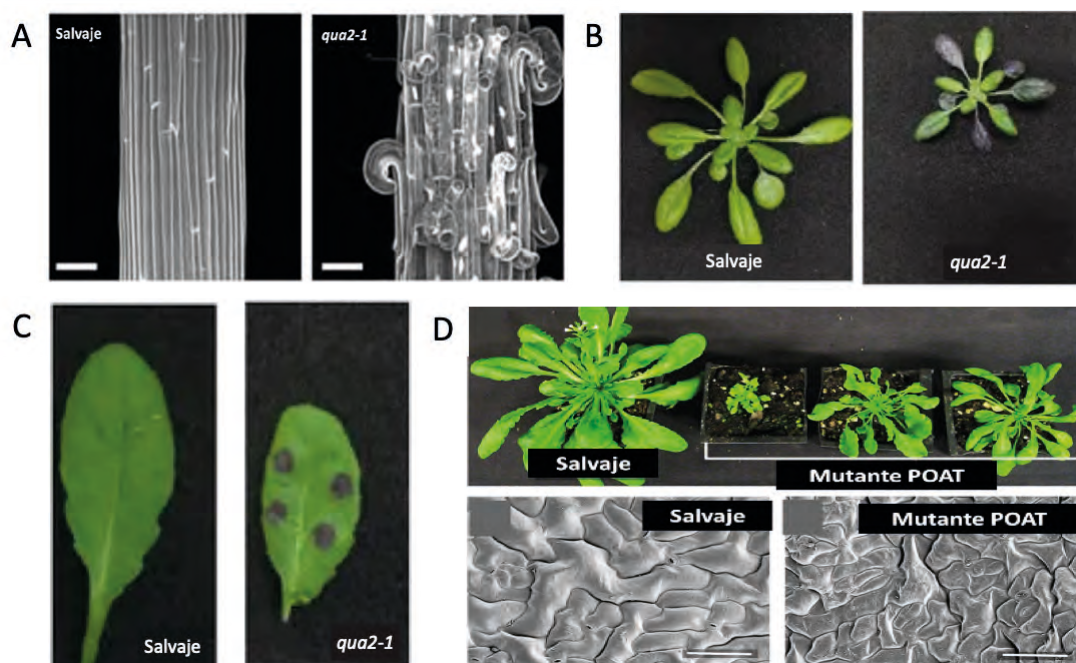


Figura 3. La estructura del homogalacturonano es clave para el desarrollo de plantas y sus respuestas a factores bióticos. **A)** Efecto del mutante *qua2-1* que codifica para la pectin metiltransferasa QUASIMODO2 en la adhesión celular de hipocótilos de *Arabidopsis thaliana*. Imagen tomada de Verger *et al.* (2016). **B)** Defectos en el desarrollo de la roseta de *A. thaliana* del mutante *qua2-1*. **C)** El mutante *qua2-1* es más susceptible al patógeno necrótrofo *Botrytis cinerea*, porque presenta lesiones debidas a la infección tras la inoculación del patógeno. Imágenes obtenidas de Lorrai *et al.* (2021). **D)** Defectos en el crecimiento y desarrollo de rosetas *A. thaliana* en mutantes en genes pectin O-acetiltransferasa (*POAT*), debido a la malformación de las células epidérmicas de la planta. Imagen tomada de Zhong *et al.* (2024).

El homogalacturonano y las respuestas de defensa de plantas a patógenos

A pesar de que cada vez hay más datos de que el control de la acetilación del homogalacturonano también tiene un papel en las respuestas de defensa de plantas, el control de la metilesterificación de este polímero es un proceso mucho más estudiado hoy en día (Cocolo y Lionetti, 2022; Zhong *et al.*, 2024). Aun así, todavía quedan muchas incógnitas por descifrar en este proceso.

Debido a la presencia de metiltransferasas en el aparato de Golgi, donde se sintetiza el homogalacturonano, y su ausencia en el apoplasto, se ha propuesto que el homogalacturonano se deposita en la pared celular con un alto grado de metilesterificación (Sénéchal *et al.*, 2014; Levesque-Tremblay *et al.*, 2015) (Fig. 4). El control del patrón y del grado de metilesterificación es llevado a cabo por una gran familia de proteínas denominada pectin metilesterasas (PMEs), que en el caso de *A. thaliana* consta actualmente de 66 miembros (Sénéchal *et al.*, 2014) (Fig. 4). A su vez, la actividad de las PMEs es finamente controlada por la inhibi-

ción estérica por parte de otra gran familia de proteínas que son los inhibidores de PME (PMEIs), de la cual se han descrito 69 miembros en *A. thaliana* (Sénéchal *et al.*, 2014; Wormit y Usadel, 2018) (**Fig. 4**). La interacción física de PMEI-PME limita el acceso del homogalacturonano al centro activo de las PMEs inhibiendo la desmetilesterificación de este polímero (Sénéchal *et al.*, 2014). Se ha propuesto, por los patrones de expresión de PMEs y PMEIs, que esta interacción tiene cierta especificidad, es decir, una PMEI podrá inhibir una PME concreta o un grupo pequeño de estas enzimas, aunque esta hipótesis no ha sido demostrada todavía (Sénéchal *et al.*, 2014; Levesque-Tremblay *et al.*, 2015). Lo que sí se ha demostrado es que tanto la actividad de PMEs como su interacción con PMEIs es un proceso muy controlado por el pH del apoplasto, por tanto, este factor es clave en el control de la desmetilesterificación del homogalacturonano (Levesque-Tremblay *et al.*, 2015; Wormit y Usadel, 2018). En definitiva, la existencia de un gran número de proteínas para controlar la desmetilesterificación de este polímero sugiere que debe ser un proceso finamente controlado dependiendo de las señales percibidas debido al desarrollo de plantas y/o factores ambientales (Levesque-Tremblay *et al.*, 2015).

Este proceso de desmetilesterificación del homogalacturonano es clave, dado que muchos fitopatógenos también poseen genes que codifican a PMEs en su genoma, las cuales son secretadas durante el proceso de infección (Cocolo y Lionetti, 2022). Una de las cosas a tener en cuenta es que las PMEs van a tener afinidad por la unión a zonas del homogalacturonano con un patrón y grado de metilesterificación concreto (Cocolo y Lionetti, 2022). Por otro lado, también se cree que no todas las PMEs van a demestilar dejando el mismo patrón, por tanto, hasta hoy en día se han propuesto dos modos diferentes de desmetilesterificación (Levesque-Tremblay *et al.*, 2015):

- Desmetilesterificación en bloque. Si dos moléculas de homogalacturonano son desmetilesterificadas en bloque se van a entrecruzar en presencia de calcio formando una estructura tradicionalmente denominada “caja de huevos”, pero que estudios recientes indican que la unión encaja más con un modelo “cremallera” (Levesque-Tremblay *et al.*, 2015; Obomighie *et al.*, 2025). La formación de interacciones entre las pectinas va a modificar las propiedades mecánicas provocando un reforzamiento de la pared celular (Levesque-Tremblay *et al.*, 2015). Por otro lado, estas interacciones van a estabilizar las moléculas de homogalacturonano y van a hacer que estas pectinas sean menos degradables por enzimas degradadoras como las pologalacturonasas (PGs) y pectin liasas (PLs), las cuales pueden ser sintetizadas por la planta y por los patógenos (Cocolo y Lionetti, 2022; Levesque-Tremblay *et al.*, 2014) (**Fig. 4**).
- Desmetilesterificación al azar. Cuando ocurre este proceso, se cree que los polisacáridos resultantes son más fácilmente degradados por las enzimas degradadoras mencionadas anteriormente (PGs y PLs).

(Levesque-Tremblay *et al.*, 2014). Esta degradación va a provocar una relajación de la pared celular. Sin embargo, también va a liberar productos de la degradación del homogalacturonano en forma de oligosacáridos denominados oligogalacturónidos (OGs) (Levesque-Tremblay *et al.*, 2014).

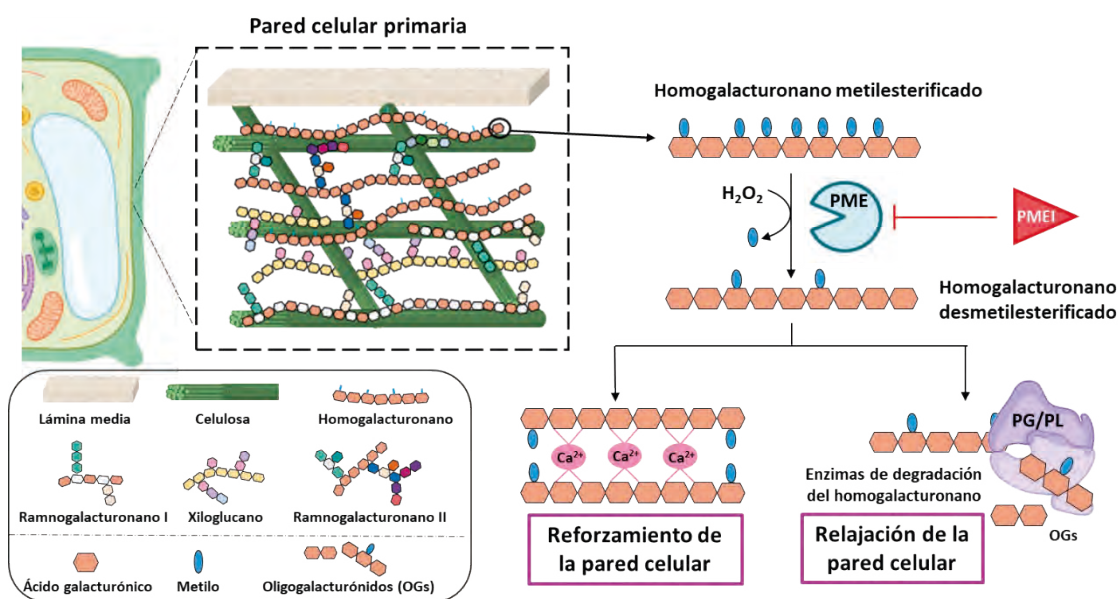


Figura 4. Esquema de la pared celular primaria y el proceso de desmetilesterificación del homogalacturonano. El proceso de demetilesterificación del homogalacturonano es llevado a cabo por unas enzimas denominadas pectin metilesterasas (PMEs), cuya actividad es controlada por sus inhibidores proteicos (PMEIs). Esta desmetilesterificación del homogalacturonano va a determinar las propiedades físico-químicas y mecánicas de la pared celular. PG: poligalacturonasas, PL: Pectato liasas; OGs: Oligogalacturónidos. Imagen propia.

Por tanto, la planta va a ser capaz de modular de una forma muy fina, mediante la acción de PMEs específicas (que poseen afinidad por patrones y grados de metilesterificación y modo de acción concreto), su inhibición con PMEIs y por el pH del apoplasto, la desmetilesterificación del homogalacturonano (Levesque-Tremblay *et al.*, 2014; Wormit y Usadel, 2018). Esto va a provocar cambios en las propiedades mecánicas de la pared celular que puede ser un proceso global o que puede producirse en determinadas zonas de la pared celular (Levesque-Tremblay *et al.*, 2014). De esta forma va a controlar las propiedades mecánicas de esta estructura, regulando procesos como la elongación celular durante el desarrollo de la planta (Levesque-Tremblay *et al.*, 2014; Coculo y Lionetti, 2022).

Los patógenos, fundamentalmente los que poseen un estilo de vida necrótrofa o hemibiótrofa, son capaces de expresar y secretar PMEs, PGs y PLs para poder degradar estas pectinas y así poder infectar la célula vegetal (Coculo y Lio-

netti, 2022). En contraposición, las plantas poseen un mecanismo de defensa denominado inmunidad inducida por patrones moleculares (o PTI por sus siglas en inglés) que, por medio de receptores situados en la membrana plasmática, perciben ciertas formas de los OGs (y otros patrones moleculares derivados de la interacción planta-patógeno) que se generan durante la degradación del homogalacturonano, lo que vamos a denominar formas activas (Ferrari *et al.*, 2013). El problema es que, dada la diversidad a nivel de estructura, se pueden generar múltiples OGs con diferente grado de polimerización y grado y patrón de metil- y acetilesterificación (Ferrari *et al.*, 2013; Coculo y Lionetti, 2022). Aunque todas las formas activas de OGs no han sido caracterizadas todavía, se ha descrito que los OGs desmetilesterificados con un grado de polimerización de entre 10 y 15 ácidos galacturónicos (OG10-15) inducen respuestas de defensa en plantas (Bellincampi *et al.*, 1996). Además, OGs más pequeños con un bajo grado de metilesterificación como trímeros o tetrámeros (OG3-4) también inducen respuestas de defensa (Davidsson *et al.*, 2017; Voxeur *et al.*, 2019). Este conocimiento es muy importante porque el tratamiento exógeno con las formas activas de estos OGs puede desencadenar respuestas de defensa que son capaces de reducir el avance de infecciones producidas por patógenos fúngicos y bacterianos (Benedetti *et al.*, 2015; Davidsson *et al.*, 2017; Voxeur *et al.*, 2019). Por tanto, el avance en el conocimiento de cuáles son las formas activas de OGs y cómo se regula este proceso es importante para comprender cómo las plantas son eficaces en la resistencia a enfermedades.

El papel del homogalacturonano en la infección con *Pseudomonas*

Las especies del género *Pseudomonas* y en concreto, *Pseudomonas syringae*, son bacterias fitopatógenas que generan importantes pérdidas económicas en el sector agrícola (Xin y He, 2013). Esta bacteria penetra en la planta por orificios naturales, como son los estomas, o por heridas, generando infecciones locales (Xin y He, 2013). Esta especie es conocida por tener una alta especificidad por el hospedador y cada cepa es capaz de infectar un número limitado de especies o cultivares de plantas, lo que ha llevado a la descripción de más de 50 patovarietades (Chen *et al.*, 2022). En el grupo de investigación FISIOVEGEN de la Universidad de León, llevamos varios años investigando el patovar *P. syringae* pv. *phaseolicola* (Pph) para estudiar la susceptibilidad en variedades de alubia común (*Phaseolus vulgaris* L.) no resistentes, como es la variedad Riñón (Arnold *et al.*, 2011; de la Rubia *et al.*, 2021a; 2021b y 2024). Este patovar se caracteriza por generar unas lesiones acuosas rodeadas de clorosis que aparecen en hojas, tallos y vainas de cultivares susceptibles características de la “enfermedad de la grasa de la alubia” (Arnold *et al.*, 2011) (**Fig. 5A y B**). Pph es un patógeno hemibiotrófico, es decir, tiene dos etapas diferenciadas durante la infección: una fase inicial biotrófica y una fase final necrotrófica (Arnold *et al.*, 2011). Dentro de la fase biotrófica, en la que la bacteria es capaz de sobrevivir sin producir la muerte de la célula vegetal, la bacteria tiene dos estadios, uno epifítico en el comienzo de

la infección y otro endofítico en el apoplasto de la célula vegetal, entorno donde debe ser capaz de sobrevivir y dividirse (Arnold *et al.*, 2011; Xin y He, 2013). Aunque se han realizado muchos estudios sobre la capacidad de la bacteria para desarrollar la infección en variedades de alubia común susceptibles, hay muy poca información sobre la capacidad de esta de sobrevivir, dividirse e invadir el espacio extracelular de las células vegetales, un ambiente hostil para el patógeno (Arnold *et al.*, 2011).

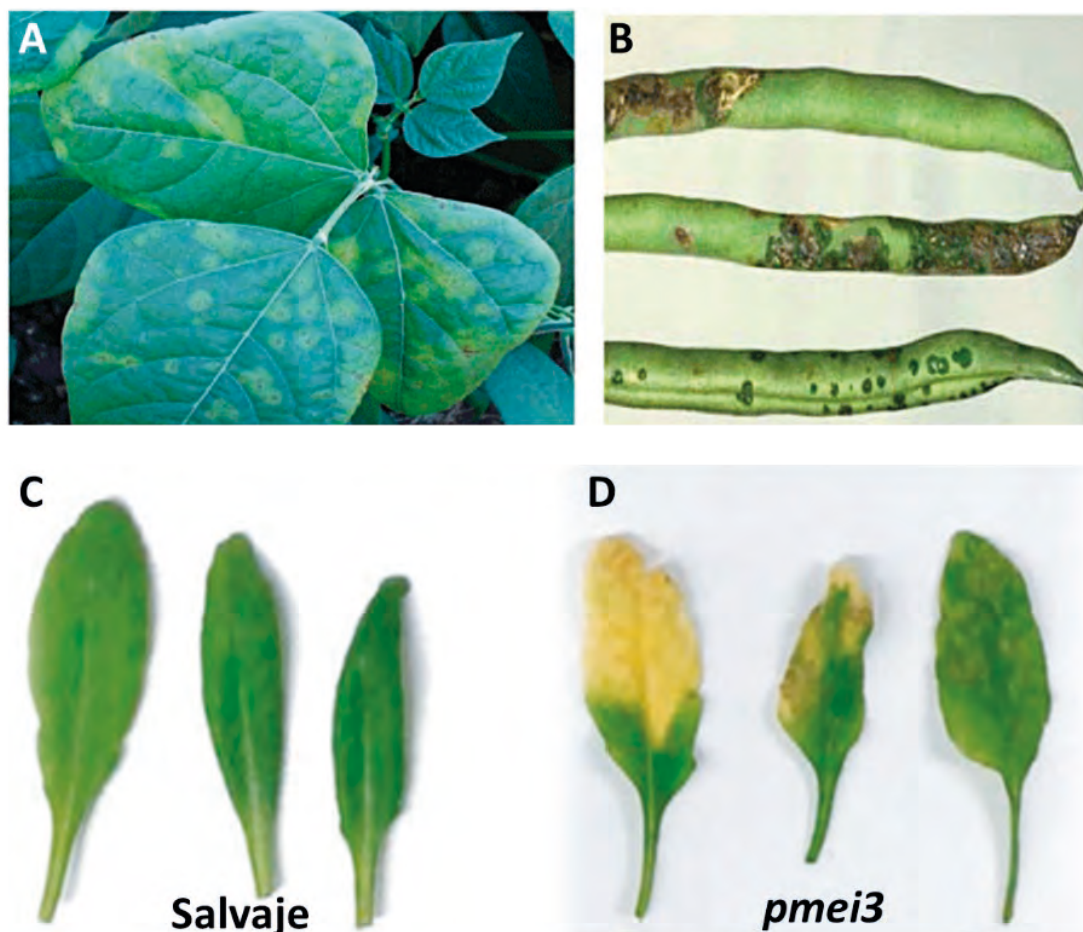


Figura 5. Síntomas de la “enfermedad de la grasa de la alubia”. Se pueden observar lesiones acuosas rodeadas de clorosis en hojas **A**) y en vainas **B**) de alubia común (*P. vulgaris* L.). Imágenes obtenidas de Arnold *et al.* (2011). El genotipo salvaje de *A. thaliana* es resistente a la infección con Pph **C**), sin embargo, un mutante en el gen *PMEI3*, que codifica para un inhibidor de PME, provoca la pérdida de la resistencia “non-host” en *A. thaliana* **D**). Imágenes obtenidas de de la Rubia *et al.* (2024).

Para tratar de comprender por qué la variedad Riñón de la alubia común es susceptible a Pph, realizamos un estudio de los cambios en el transcriptoma por RNA-seq durante el proceso de infección de plantas de alubia común con Pph (de la Rubia *et al.*, 2024). Este estudio reveló que al inicio de la infección se pro-

ducía la sobreexpresión de un gran número de genes, pero que esta sobreexpresión general era reducida a medida que la infección progresaba (de la Rubia *et al.*, 2024). Un gran número de los genes sobreexpresados estaban relacionados con la pared celular y, específicamente, con el control de la metilesterificación del homogalacturonano, en el cual destacaba el gen *PvPMEI3* de la alubia común (de la Rubia *et al.*, 2024). Estos resultados correlacionaban con cambios en el grado de metilesterificación del homogalacturonano durante el proceso de infección con Pph (de la Rubia *et al.*, 2024). Como Pph posee genes que codifican para enzimas degradadoras de homogalacturonano, como son las PGs y PLs, los resultados sugerían que este patógeno utilizaba la modulación del grado de metilesterificación para poder degradar las pectinas y así poder infectar la célula vegetal (de la Rubia *et al.*, 2024). Para poder demostrar esta hipótesis decidimos obtener plantas mutantes de *A. thaliana* que afectaran a la expresión del gen ortólogo de *PvPMEI3*, denominado *AtPMEI3* (de la Rubia *et al.*, 2024). Teniendo en cuenta que el genotipo salvaje de *A. thaliana* no es hospedador Pph (resistencia “non-host”), pudimos demostrar que los mutantes *pmei3* de *A. thaliana* mostraban susceptibilidad a la infección con Pph (de la Rubia *et al.*, 2024) (**Fig. 5C y D**). Este resultado es muy interesante porque nos muestra que la falta de expresión de únicamente un gen *PMEI* puede ser clave en la resistencia “non-host” que naturalmente posee el genotipo salvaje de *A. thaliana* y, por tanto, el control de la metilesterificación del homogalacturonano es clave en la infección de este fitopatógeno.

Recientemente nos han adjudicado un proyecto “Generación de Conocimiento 2024” a varios miembros del grupo FISIOVEGEN de la Universidad de León cuyo objetivo es tratar de comprender por qué las plantas mutantes *pmei3* de *A. thaliana* pierden la resistencia “non-host” típica del genotipo salvaje. Queremos estudiar si la modificación de las propiedades físico-químicas y mecánicas de la pared celular pueden afectar a la invasión del espacio extracelular por Pph y si la modulación del grado de metilesterificación del homogalacturonano puede perturbar las respuestas de defensa de plantas. Por último, vamos a desarrollar tratamientos sostenibles basados en la inhibición química de actividad PME promovida por el tratamiento con catequinas, que podrían proteger a la alubia frente a la infección por Pph. Estas catequinas están presentes en grandes cantidades en residuos de té verde (tras su infusión), los cuales pueden ser aprovechados para generar productos de alto valor agronómico, impulsando de esta manera la economía circular.

Bibliografía

- Arnold, D. L., Lovell, H. C., Jackson, R. W. y Mansfield, J. W. (2011). *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*: from ‘has bean’ to supermodel. *Molecular Plant Pathology*, 12(7), 617-627.
- Bellincampi, D., Cardarelli, M., Zaghi, D., Serino, G., Salvi, G., Gatz, C., Cervone, F., Altamura, M. M., Costantino, P. y Lorenzo, G. D. (1996). Oligogalacturonides pre-

- vent rhizogenesis in *rolB*-transformed tobacco explants by inhibiting auxin-induced expression of the *rolB* gene. *The Plant Cell*, 8(3), 477-487.
- Boerjan, W., Burlat, V., Cosgrove, D. J., Dunand, C., Dupree, P., Haas, K. T., Ingram, G., Jamet, E., Mohnen, D., Moussu, S., Peaucelle, A., Persson, S., Voiniciuc, C. y Höfte, H. (2024). Top five unanswered questions in plant cell surface research. *The Cell Surface*, 11, 100121.
- Chen, H., Chen, J., Zhao, Y., Liu, F. y Fu, Z. Q. (2022). *Pseudomonas syringae* pathovars. *Trends in Microbiology*, 30(9).
- Coculo, D. y Lionetti, V. (2022). The plant invertase/pectin methylesterase inhibitor superfamily. *Frontiers in Plant Science*, 13, 863892.
- Cosgrove, D. J. (2022). Building an extensible cell wall. *Plant Physiology*, 189(3), 1246-1277.
- Davidsson, P., Broberg, M., Kariola, T., Sipari, N., Pirhonen, M. y Palva, E. T. (2017). Short oligogalacturonides induce pathogen resistance-associated gene expression in *Arabidopsis thaliana*. *BMC Plan Biology*, 17(1), 19.
- De la Rubia, A. G., Centeno, M. L., Moreno-González, V., De Castro, M. y García-Angulo, P. (2021a). Perception and first defense responses against *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* in *Phaseolus vulgaris*: Identification of Wall-Associated Kinase Receptors. *Phytopathology*, 111(12), 2332-2342.
- De la Rubia, A. G., Largo-Gosens, A., Yusta, R., Sepúlveda-Orellana, P., Riveros, A., Centeno, M. L., Sanhueza, D., Meneses, C., Saez-Aguayo, S. y García-Angulo, P. (2024). A novel pectin methylesterase inhibitor, PME13, in common bean suggests a key role of pectin methylesterification in *Pseudomonas* resistance. *Journal of Experimental Botany*, 75(1), 364-390.
- De la Rubia, A. G., Mérida, H., Centeno, M. L., Encina, A. y García-Angulo, P. (2021b). Immune priming triggers cell wall remodeling and increased resistance to halo blight disease in common bean. *Plants*, 10(8), 1514.
- Delmer, D., Dixon, R. A., Keegstra, K. y Mohnen, D. (2024). The plant cell wall—dynamic, strong, and adaptable—is a natural shapeshifter. *The Plant Cell*, 36(5), 1257-1311.
- Ferrari, S., Savatin, D. V., Sicilia, F., Gramegna, G., Cervone, F. y Lorenzo, G. D. (2013). Oligogalacturonides: plant damage-associated molecular patterns and regulators of growth and development. *Frontiers in Plant Science*, 4, 49.
- Fuertes-Rabanal, M., Rebaque, D., Largo-Gosens, A., Encina, A. y Mérida, H. (2025). Cell walls: a comparative view of the composition of cell surfaces of plants, algae, and microorganisms. *Journal of Experimental Botany*, 76(10), 2614-2645.
- Gómez de Agüero y Largo-Gosens. 2024. Estudio del mucílago de semillas mutantes para conocer el papel de la arabinosa en la pared celular. *AmbioCiencias*. 22: 77-90

- Hooke R. (1665). *Micrographia, or, some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses: with observations and inquiries thereupon*. London: printed by Martyn J, and Allestry J, printers to the Royal Society.
- Levesque-Tremblay, G., Pelloux, J., Braybrook, S. A. y Müller, K. (2015). Tuning of pectin methylesterification: consequences for cell wall biomechanics and development. *Planta*, 242(4), 791-811.
- Lorrai, R., Francocci, F., Gully, K., Martens, H. J., De Lorenzo, G., Nawrath, C. y Ferrari, S. (2021). Impaired cuticle functionality and robust resistance to *Botrytis cinerea* in *Arabidopsis thaliana* plants with altered homogalacturonan integrity are dependent on the class III peroxidase AtPRX71. *Frontiers in Plant Science*, 12, 696955.
- McFarlane, H. E. (2023). Open questions in plant cell wall synthesis. *Journal of Experimental Botany*, 74(12), 3425-3448.
- Mohnen, D. (2008). Pectin structure and biosynthesis. *Current Opinion in Plant Biology*, 11(3), 266-277.
- Obomighie, I., Prentice, I. J., Lewin-Jones, P., Bachtiger, F., Ramsay, N., Kishi-Itakura, C., Goldeberg, M. W., Hawkins, T. J., Sprittles, J., Knight, H. y Sosso, G. C. (2025). Understanding pectin cross-linking in plant cell walls. *Communications Biology*, 8(1), 72.
- Sénéchal, F., Wattier, C., Rustérucci, C. y Pelloux, J. (2014). Homogalacturonan-modifying enzymes: structure, expression, and roles in plants. *Journal of Experimental Botany*, 65(18), 5125-5160.
- Verger, S., Chabout, S., Gineau, E. y Mouille, G. (2016). Cell adhesion in plants is under the control of putative O-fucosyltransferases. *Development*, 143(14), 2536-2540.
- Voxeur, A., Habrylo, O., Guénin, S., Miart, F., Soulié, M. C., Rihouey, C., Pau-Roblot, C., Domon, J-M., Gutierrez, L., Pelloux, J., Mouille, G., Fagard, M., Höfte, H. y Vernhettes, S. (2019). Oligogalacturonide production upon *Arabidopsis thaliana*-*Botrytis cinerea* interaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(39), 19743-19752.
- Wormit, A. y Usadel, B. (2018). The multifaceted role of pectin methylesterase inhibitors (PMEIs). *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10), 2878.
- Xin, X. F. y He, S. Y. (2013). *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* DC3000: a model pathogen for probing disease susceptibility and hormone signaling in plants. *Annual Review of Phytopathology*, 51(1), 473-498.
- Zhang, Y., Yu, J., Wang, X., Durachko, D. M., Zhang, S. y Cosgrove, D. J. (2021). Molecular insights into the complex mechanics of plant epidermal cell walls. *Science*, 372(6543), 706-711.
- Zhong, R., Cui, D., Richardson, E. A. y Ye, Z. H. (2024). Acetylation of homogalacturonan and rhamnogalacturonan-I is catalyzed by a suite of trichome birefringence-like proteins. *The Plant Journal*, 117(4), 1084-1098.

UNO DE LOS NUESTROS

Santiago o la forja de un Nobel: infancia y juventud de Cajal

José Manuel Ramón y Cajal¹ y Estanislao de Luis Calabuig²

¹ Médico especialista en Ginecología. Huesca

Vicepresidente nacional de la Asociación Española Contra el Cáncer

² Catedrático de Ecología jubilado. Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental. Universidad de León

“El entusiasmo y la perseverancia hacen milagros.”

Santiago Ramón y Cajal

Resumen

Recrear la infancia y la juventud del premio Nobel español Santiago Ramón y Cajal tiene como propósito establecer la influencia de sus actitudes y aptitudes de ese periodo crítico de la vida, que pueden posteriormente reflejarse en la madurez. Su interés por todo tipo de actividades a las que se encomendaba por elección propia, dejaban patente su fuerza de voluntad y su perseverancia, desde el manejo de la honda, o la fabricación de rudimentarias armas, pasando por el entrenamiento en profesiones corrientes como la barbería o la zapatería, hasta el dibujo, la fotografía, la novela narrativa o la autobiográfica, el entretenimiento con el ajedrez o la gimnasia, la destreza en el dibujo o la incipiente fotografía, o el simple pasatiempo de tertulias y charlas de café, fueron útiles conocimientos, destrezas y facultades del cuerpo y del espíritu que le acompañaron en sus logros científicos, culminados en un premio Nobel.

Palabras clave

Infancia, juventud, premio Nobel, Ramón y Cajal.

Infancia

Los padres de Santiago Ramón y Cajal procedían de Larrés, pequeña localidad cerca de Sabiñánigo (Huesca). Su padre Justo Ramón Casasús quería ser cirujano rural. En su inicio ejerció como practicante en el Hospital Provincial de Zaragoza y posteriormente se trasladó a Barcelona donde obtuvo el título de cirujano de segunda clase. En Larrés conoció a su futura esposa Antonia Cajal Puente y se trasladaron al conseguir trabajo a un pequeño pueblo navarro, Petilla de Aragón (**Fig. 1**), enclavado por cuestiones históricas en la provincia de Zaragoza.

Allí nace Santiago el 1 de mayo de 1852 y dos años más tarde regresan a Larrés, ya con su padre como doctor en medicina, y nació su hermano Pedro, quién pasado el tiempo llegaría a ser catedrático de la Facultad de Medicina de Zaragoza.

Se trasladaron después a la populosa villa zaragozana de Luna en 1855, y poco más tarde a Valpalmas, localidad próxima a la anterior donde nacieron sus hermanas Pabla y Jorja, y en la que la familia Ramón y Cajal permaneció hasta 1860.



Figura 1. Casa natal en Petilla de Aragón, Navarra. Fotografía de Santiago Ramón y Cajal tomada en 1892 (Izqda.); el pueblo antes, fotografía de Santiago Ramón y Cajal (Dcha. sup.) y ahora (Dcha. inf.)

En Valpalmas inició su educación en una modesta escuela, y a los seis años, con la inestimable y suplementaria enseñanza de su padre, ya escribía con aceptable ortografía y tenía conocimientos básicos de aritmética, geografía y francés. Por aquella época gustaba de contemplar los fenómenos naturales y tenía una especial fascinación por los animales, fundamentalmente los pájaros. Curioso que era de las manifestaciones naturales, vivió con cierta angustia y en primera línea el rayo que cayó en su escuela; y quedó admirado de la precisión del eclipse del 1860 al comprobar personalmente lo que su padre previamente le había explicado.

Cuando tenía 8 años su familia se trasladó a la villa de Ayerbe (**Fig. 2**), mucho más importante que las anteriores, situada en el Somontano oscense, al obtener su padre la plaza de médico. Los chavales del pueblo le recibieron con recelo, burlas, insultos, puñetazos y pedradas tratándole de “*señorito*” por vestir distinto, sin calzones, ni alpargatas, ni pañuelos en la cabeza, y por su forma de hablar, alejado de los aragonesismos cotidianos empleados en el pueblo, por lo que le tachaban de forastero. Tardó en hacer amistad, pero consiguió familiarizarse con el lenguaje popular, y aprender las mañas en los juegos infantiles, llegando al final a hacerse el líder de la pandilla.



Figura 2. La torre del reloj y el palacio de Ayerbe en la villa del mismo nombre, considerada la patria chica de Cajal. Fotografía de Ramón y Cajal (Izqda.) y situación actual (Dcha.).

Los juegos de su época, en los que alcanzó una gran destreza, se han recordado en la exposición presentada en 2022 en el Palacio de Ayerbe (**Fig. 3**). Esta muestra, organizada en su honor como contribución al 170º aniversario de su nacimiento, tuvo como objetivo abordar los años que el premio Nobel pasó en la localidad y ayudar a entender cómo las experiencias vividas en la villa pudieron haber sido decisivas en la formación de su carácter y marcar su vida para siempre. Se recrea así ese periodo de la infancia de un niño al que familiarmente llamaban Santiagué. Relata él de sí mismo que en aquella época tomaba parte en los juegos del peón, del tejo, de la *spandiella* y del marro, además de las rutinarias carreras, saltos y peloterías espontáneas e inicuas, pero también algunas travesuras pueriles algo más arriesgadas y comprometidas, bajo el epígrafe de aventuras, como las contiendas a pedrada limpia, asaltar huertos, o ir a robar uvas, higos o melocotones. Trepaba árboles como un mono, brincaba como un saltamontes, corría como un gamo, subía paredes como una lagartija sin miedo alguno a las alturas, y fue un tremendo experto en palos, en flechas, no solo de buen alcance, sino también planteadas para obedecer fielmente a la trayectoria programada, y sobre todo en el diseño y manejo de la honda, que lo hacía con singular tino y maestría.

En esos años en Ayerbe los padres estaban muy preocupados por él, pero ni los duros castigos lograban encarrilarlo. Allí se inició su pasión por el dibujo y la pintura. No solo en casa, en las hojas que guardaba como un tesoro, ya que más o menos lo tenía prohibido, sino que cualquier pared le valía para copiar carretas, caballos y aldeanos, fabricando él mismo las pinturas de colores. La vena artística absorbió cada vez más su interés y contribuyó a un cierto aislamiento como necesidad de huir de distracciones, para centrarse en los ensueños que trasladaba al papel en escenas que surgían de memoria, pero que no representaban la realidad de su entorno, ni las cosas más frecuentes en la vida de un niño de aquella edad. Tras el desengaño forzado por veredicto de un pintor de brocha gorda y la anuencia de su padre, en ese momento le quedó bastante claro que, por imperativo paterno, debería sustituir el pincel por el bisturí, aunque siguió a escondidas usando del dibujo y la pintura para menesteres varios, y algunos poco oportunos.



Figura 3. Una de las salas de la exposición dedicada al joven Santiagoé por la Asociación para la Promoción Integral de Ayerbe y Comarca en 2022, para contribuir a la celebración del 170 aniversario del nacimiento de Ramón y Cajal, y recordar los años de infancia transcurridos en esa localidad.

Ante la rebeldía de Santiagoé, su padre lo envió con 10 años a empezar el bachillerato en los Escolapios de Jaca, conocidos en la región por educar y domar a muchachos difíciles y revoltosos. Él insistía en que lo llevaran a Huesca o Zaragoza, ya que había escuelas de dibujo, que seguía siendo su ilusión preferente, pero su padre se negó en redondo, confiando en los Escolapios para que le enderezaran, ya que su padre quería que fuera médico, aunque a él, en ese momento, no le agradaba la medicina (**Fig. 4**).

En los Escolapios empezó una tarea dura ya que el espíritu de la enseñanza no era de pensar y sí en memorizar. Durante esa estancia le infirieron diversos tipos de castigos, entre los que estaba el del ayuno, con lo que solo consiguieron que creciera mucho y perdiera peso. Aunque fue suspendido en el Colegio por su comportamiento rebelde y continuado, al final los profesores del Instituto de Huesca resolvieron aprobarlo, alegando comparación de conocimientos con el resto de alumnos examinados.

Llegadas las vacaciones volvió a Ayerbe y su madre lo vio tan desmejorado que se preocupó muchísimo cuidándolo con mimo. Santiagoé volvió a ponerse fuerte y también reiniciaron sus aventuras, pero los juegos pasados le parecieron ya infantiles y aburridos, así que maquinó empresas más atrevidas, como la fabricación de escopetas, cañones y pólvora. Estos experimentos de alquimia fundamentaron su habilidad para los estudios histológicos. El disparo del cañón en un huerto cercano le supuso tres días de cárcel, con privación de alimento por propia orden de su padre, aunque en realidad no llegara esta última a cumplirse.

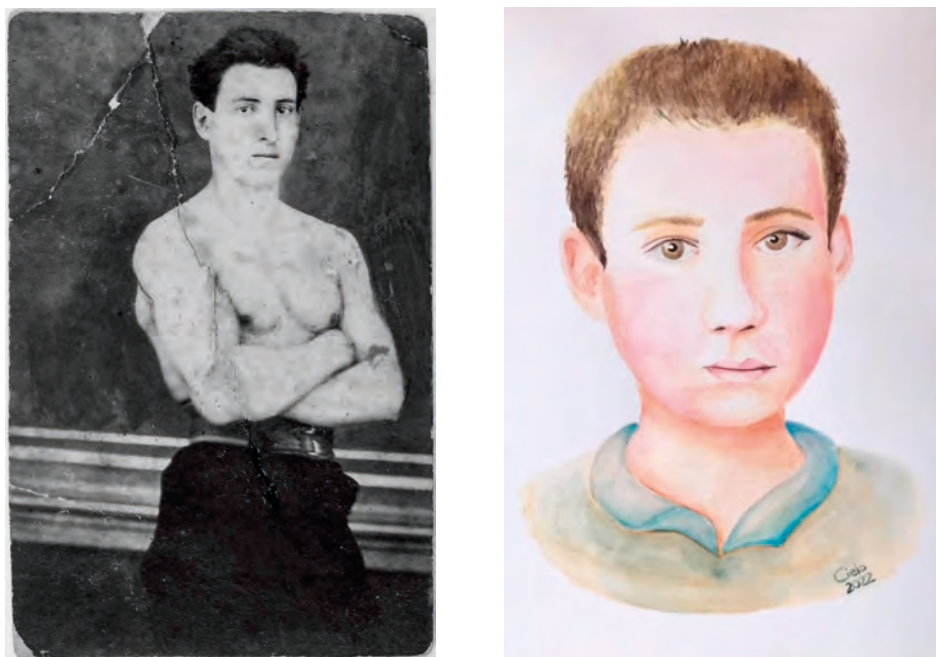


Figura 4. En la celebración del 170 aniversario del nacimiento de Cajal se procesó una fotografía de cuando tenía 20 años, tratada digitalmente para obtener, mediante algoritmos, una regresión al Santiagué de 12 años, imagen que después fue versionada por la ilustradora oscense Cielo Entrena para recrear el aspecto del científico a la edad en la que vivió en Ayerbe, y de la que no existía ninguna imagen.

Juventud

A partir de ese momento sus padres lo trasladaron a Huesca para proseguir sus estudios de bachiller en el Instituto de Huesca (**Fig. 5**), tras sus repetidos fracasos en los estudios de infancia. Llegó a Huesca en el año 1864 cuando tenía 12 años y pasó sus años de adolescencia hasta los 16.



Figura 5. Instituto de Huesca donde Ramón y Cajal prosiguió sus estudios de bachillerato. Fotografía realizada por él mismo, edificio que fue la sede de la Universidad Sertoriana (Izqda.), y situación actual como Museo Arqueológico de Huesca (Dcha).

Allí se le abrió el horizonte porque estaba deseoso de conocer nuevos paisajes. Retomó sus inquietudes artísticas y gastó algún real disponible para hacerse con papel y caja de acuarelas. Un profesor de geografía supo ganarse la atención de los chavales. Santiagué valoró el método de enseñanza y en un santiamén, ayudado por su experiencia y afición por el dibujo, cubría un papel con el mapa de Europa trazando de memoria ríos y contornos. Esos ratos de felicidad eran ensombrecidos por los insolentes “*gallitos de cursos superiores*” que se metían con él, agrediendo verbal y físicamente, moteándolo de “*carnicraba*”, apelativo que se aplicaba en la capital de la provincia a los oriundos ayerbenses. Eso supuso un desafío para su mente analítica e inicio un trabajo muscular para enfrentarse a ellos. Cerca de los paisajes cercanos al río Isuela de Huesca se desarrollaban los entrenamientos de Santiagué y sus puños infundieron respeto a los matones de los últimos años, llegando a hacer buenas migas con los anteriores camorristas. Allí también se repitieron sus inclinaciones pictóricas, que en este caso se acercaron a recrear el mundo de las plantas y de los insectos.

Superado el curso, volvió de nuevo a Ayerbe para disfrutar de las vacaciones del verano. El primer cometido fue contactar con los camaradas y ponerles al día de las aventuras vividas y de sus obras pictóricas. Su padre dictaminó como deber repasar las asignaturas y prepararse para el siguiente curso. Con el pretexto de centrarse en ese paternal mandato, pero con el fin de sortear la vigilancia familiar, pidió permiso para estar en el palomar de su casa como lugar más recogido y tranquilo, y utilizarlo como cuarto de trabajo. Allí guardaba sus secretos, tesoros, papel, lápices y pinturas, y también podía inspeccionar los tejados vecinos. Vio desde el palomar que un vecino pastelero guardaba cestas de deliciosos pasteles, y observó por primera vez una biblioteca con estanterías llenas de libros, e ideó un plan para sustraerlos sin levantar sospechas. Así, los cogía prestados, los leía y devolvía: libros como *El Quijote*, *El Conde de Montecristo* o *Robinson Crusoe*.

Tras ese magnífico verano volvió a Huesca para estudiar tercero de bachillerato y su padre, para que estuviese ocupado todo el tiempo, lo colocó de aprendiz de barbero. Eso no era para él y, con su hermano Pedro, se hizo experto en tiro con honda, atemorizando a los gallitos del instituto, e incluso escribió una guía con el nombre “*Estrategia lapidaria*”. Las muchachas estaban aterrorizadas, pero recuerda a una rubita, grácil, de ojos verdes, mejillas y labios de geranio y largas trenzas color de miel. Esa chica fue su futura esposa Doña Silveria Fañánas García.

Por tres ocasiones más su padre arremetió contra la rebeldía del chaval enviándole como aprendiz de zapatero. Primero antes de terminar el mes de junio en Gurrea de Gállego, pueblo al que circunstancialmente se había trasladado la familia, con un amo que le trató con dureza, traducida en austera alimentación y aislamiento moral. Tras el nuevo traslado a Ayerbe y con el mismo oficio le colocaron con un patrón al que se le fijaron los mismos objetivos, con trato sin miramientos y pretensión de allanar antojos, pero en este caso el dueño quedó

encantado de sus mañas y progresos. Y el tercero en una mejor tienda, amparado por las habilidades adquiridas.

Un año más tarde su padre dispuso la vuelta a los estudios, considerando superado el experimento personal educativo y el compromiso de mayor aplicación, pero con la condición de poder matricularse en dibujo, aunque debería compartir su tiempo como mancebo de barbería. En este periodo desarrolló aficiones, intereses y genialidades que le acompañarían a lo largo de toda su vida. Perfeccionó el dibujo al iniciar sus clases con el profesor León Abadías y Santolaria, y cubrió en poco tiempo varios niveles de este arte pictórico, tanto en lápiz como con acuarelas, llegando a ser el discípulo más brillante de todos los que había pasado por la Academia, y siendo al final del curso premiado y valorado con nota de sobresaliente (**Fig. 6**). El maestro visitó a su padre para comentarle las excelentes dotes con las que estaba dotado su hijo, pero no fue suficiente y las pretensiones quedaron paralizadas en ese sentido, pero sin duda esto fue determinante para su posterior facilidad en los dibujos anatómicos. También fue la causa de un suspenso en ese curso de bachiller al plasmar la caricatura de un profesor en un lugar visible y con testigos que le señalaron.



Figura 6. El dibujo fue la pasión permanente de Cajal. Algunos dibujos de su juventud (sup.) y algunas de sus representaciones científicas (inf.): astrocitos en el hipocampo del cerebro humano (Izqda.); laberinto del oído interno (centro); corte transversal de la médula espinal de *Lacerta agilis* (Dcha).

En el verano de 1868, con 16 años, se inició en los estudios anatómicos, disciplina de la que ha dejado una buena muestra de dibujos. Su padre también le dedicó bastante tiempo para que se aficionara a la anatomía, y empezaron por conseguir huesos en una noche de luna de una exhumación del cementerio.

Se interesó por la fotografía, observando la técnica de Daguerre y sus famosos *daguerrotipos* con un fotógrafo ambulante que visitó Huesca durante esos años. Él mismo practicó el revelado en algunas iglesias de la ciudad aprovechando sus espacios oscuros. También en Huesca, inició su pasión por materias como la psicología, la lógica y la ética. De todo ello da buena cuenta en varios capítulos de sus memorias “*Recuerdos de mi vida*”, relatando con claridad, en sus propias palabras que, en su traslado desde Ayerbe, pasando de la zona rural a la urbana, se abrió al universo en Huesca.

Se empañó en aprobar el bachillerato y lo hizo con gran satisfacción de su padre viendo que, al fin, su hijo había sentado la cabeza y *era menos gandul y frívolo* de lo que él había creído, sintiéndose orgulloso. La relación entre don Justo y él siempre fue muy tensa.

Al fin, en 1870 aprobó el curso preparatorio e inicio su formación en la Escuela Libre de Medicina en Zaragoza.

Hay autores como Javier Sampedro, biólogo y periodista, que dice que Santiago Ramón y Cajal nació dotado para el arte y la ciencia, y otros autores como Arsuaga y Millas consideran a Cajal al nivel de Einstein o Newton. Eric Kandel, Premio Nobel en el año 2000 de Medicina y Fisiología dijo de él “*Cajal sentó las bases para el estudio moderno del sistema nervioso y podría decirse que es el científico del cerebro más importante que jamás haya existido*”.

Además de científico, Ramón y Cajal fue un humanista polifacético, que se dedicó a observar la realidad de su tiempo. Destacó por sus valores humanos, gran voluntad, solidaridad y generosidad. Tenía interés por actividades de todo tipo a las que se entregaba con pasión, desde tirar piedras con honda, pasando por el ajedrez, el dibujo, la fotografía, la gimnasia, la novela científica, el género literario autobiográfico, las tertulias o las charlas de café, entre muchas otras.

Bibliografía

- Corisco, María. 2022. Los pesares de Ramón y Cajal. Las facetas menos conocidas del genio. La Voz de Galicia. XLSemanal.28.05.2022.
- Dolç Dolç, Miguel. 1952. Ramón y Cajal en el Instituto de Huesca. Argensola: Revista de Ciencia Sociales del Instituto de Estudios Altoaragoneses. nº 10. pp: 97-124.
- García Macías, Isabel. 2022. Santiagué, un niño carnicraba o los años de infancia de Ramón y Cajal en Ayerbe. Heraldo digital. Noticia 7 de julio de 2022.
- González Ollé, Fernando. 1984. El habla de Ayerbe y otros aragonesismos en la autobiografía de Santiago Ramón y Cajal. Archivo de Filología Aragonesa. Institución

- Fernando el Católico. Diputación Provincial de Zaragoza. Vol. 34-35, pp: 361-393
- Ramón y Cajal, Santiago. 1895. Les nouvelles idées sur la structure du système nerveux chez l'homme et chez les vertébrés. C. Reinwald & C^{ie}, Libraires-Éditeurs. París.
- Ramón y Cajal, Santiago. 1901. *Recuerdos de mi vida. Tomo 1. Mi infancia y juventud*. Imprenta de Fortanet, Madrid. En 1917 apareció la segunda edición compuesta por dos tomos: Tomo 1, *Mi infancia y juventud* y Tomo II, *Historia de mi labor científica*. Imprenta y librería de Nicolás Moya, Madrid. En 1923 la tercera edición reunió la obra en un único tomo. Imprenta de Juan Pueyo, Madrid.
- Ramón y Cajal, Santiago. 1921. Cuando yo era niño... La infancia de Ramón y Cajal contada por él mismo. Vol. 1. Biblioteca Reus para niños. Editorial Reus S.A. Madrid. Prólogo de Luis de Zulueta. 148 pags.
- Sanchez Ron, José Manuel. 2020. El País de los Sueños Perdidos. Historia de la ciencia en España. Ed. Taurus. 1152 pp.
- <http://simurg.csic.es/view/990001439950204201/API=https://www.instagram.com/developer>

Fulgor y muerte de Nicolai Vavilov (1889-1943)

Pablo Huerga Melcón

Profesor Contratado Doctor
Área de Filosofía, Universidad de Oviedo

1. En el Parque de la Feria de Muestras de los Logros del Socialismo de Moscú (el “Vedenjá”) es posible todavía contemplar la monumental escultura de Vera Mújina, *El obrero y la koljosiana* (**Fig. 1**). Creada para la exposición de París de 1937, recoge el sentido fundamental de la revolución bolchevique. Sobre esos dos polos, el campo y la industria, habría de construirse el socialismo. La unión de campesinos y obreros significaba la industrialización del campo y su colectivización, realizada a marchas forzadas y con consecuencias políticas complejas. Es en ese contexto prometeico en el que se encuadra la trágica figura de uno de los más audaces biólogos del siglo XX, Nicolai Ivanovich Vavilov.



Figura 1. Obrero y koljosiana. Centro de exposiciones de Moscú. Acero inoxidable, 24,5 metros.

Nacido el 26 de noviembre de 1887 en una familia acomodada, su padre, Iván Vavilov, era copropietario de la “Factoria Projorovski”, una gran compañía textil de la época. El propio abuelo de Nicolai Vavilov había vivido bajo la condición de siervo en la aldea de Ivaskov, en la periferia de la provincia de Moscú. Precisamente por esa condición de miseria, el abuelo envió al padre de Vavilov con diez años a trabajar a Moscú, donde dio muestras de un extraordinario talento para los negocios. Los cuatro hijos de Iván Vavilov se dedicaron, sin embargo, a la ciencia. El hermano de Nicolai, Serguei Vavilov (**Fig. 2**), eminente físico soviético, llegó a ser presidente de la Academia de Ciencias de la URSS en 1945. Sus dos hermanas, Lidia y Alexandra, se dedicaron también con éxito a la biología (aunque Lidia murió muy joven). Nicolai Vavilov tuvo dos hijos, Oleg (1918-1948), con Yekaterina Sakharova, y Yuri (1927-2006), con Yelena Barulina (Pringle, 2008).



Figura 2. Nicolai (izquierda), con su madre Aleksandra y su hermano menor Serguéi.

Después de los estudios de secundaria, se matriculó en el Instituto Agrícola de Moscú, una de las más prestigiosas instituciones de educación superior en Rusia. Entre sus primeras investigaciones como posgraduado desarrolló una hipótesis genética sobre la resistencia de las plantas a las enfermedades, bajo la dirección del científico Ilia Mechnikov, que le permitió buscar líneas resistentes

en la naturaleza o crearlas mediante hibridación y selección. Entre 1913 y 1914 viajó por Gran Bretaña, Francia y Alemania, siguiendo con su formación. Estudió con Bateson, trabajó también en Francia en el Instituto Pasteur, y en la conocida empresa agrícola Vilmorin, decisiva a la hora de organizar algunas de sus expediciones agronómicas posteriores. En Alemania trabajó con Ernst Haeckel, aunque el estallido de la Primera Guerra Mundial le obligó a abandonar el país precipitadamente. Como curiosidad, sabemos que Vavilov facturó su equipaje en un barco de vapor que fue hundido por una mina, mientras él regresaba a Rusia en tren.

Ya en el año 1916 había recibido el encargo de investigar la extraña enfermedad que padecían los soldados del ejército ruso en las regiones de Persia y el Pamir. Vavilov viajó hasta el lugar y descubrió que dicha enfermedad procedía del pan con el que se alimentaban. El trigo iba mezclado con cizaña (*Lolium temulentum* L.) parasitada por el cornezuelo.

2. En 1917, el año de la revolución, fue destinado como catedrático a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Sarátov. La revolución fue un duro golpe para su familia. Su padre abandonó el país, pero Nicolai y el resto de la familia permanecieron en la URSS. Fue en Sarátov, en el Congreso Soviético de Mejora Vegetal de 1920, donde propuso su Ley de las series homólogas en la variación, según la cual en especies y géneros emparentados aparecen series paralelas de variación hereditaria (Vavilov, 1920). Es decir, si en una especie aparece cierta mutación útil, es probable que en especies cercanas aparezcan variaciones semejantes. “Comparando numerosas líneas de plantas de especies y géneros relacionados, Vavilov estableció que dentro de cada grupo hay características hereditarias similares que forman series regulares, y que cuanto más próximas genéticamente son las especies examinadas, mayor similitud presentan las series de variación”. Vavilov preparó tablas de variación, en las que había muchas lagunas y declaró con seguridad que con el tiempo se irían completando. Por primera vez, los biólogos tenían la oportunidad de predecir la existencia de formas que aún no se habían encontrado ni descrito (Reznik y Vavilov, 1997). Actualmente, los trabajos de Antonio Perejón y Elena Moreno-Eirís (2006) muestran que la ley de las series homólogas ha servido de fundamento para investigaciones en Paleontología en la sistemática de los arqueociatos, tal y como proponía el paleontólogo soviético Rozanov (1974). Al final de aquella conferencia titulada “La Ley de las Series Homólogas en la Herencia de las Variaciones”, y en medio de los aplausos, alguien gritó: “¡Biólogos, salud a vuestro Mendeleiev!”.

En 1921 fue nombrado director del Departamento de Botánica Aplicada del comité científico de Leningrado, dirigido hasta entonces por su maestro Robert Regel. Remodelado posteriormente como Instituto Soviético de Agronomía, VIR, en esta institución legendaria desarrollará Vavilov gran parte de su labor científica. El Instituto, coloquialmente llamado *Babilonia* por sus trabajadores, comprendía una red de estaciones de investigación distribuida por todo el país.

Vavilov se rodeó de grandes colaboradores en el ámbito de la agrobotánica como Gavril Zaitsev, especialista en el algodón, que dirigía una estación de mejora vegetal en Asia Central, Leonid Góvorov, especialista en leguminosas, Constantin Fralsberger, especialista en el trigo, Constantin Pangalo, especialista en cítricos, o Nicolai Kulechov, en maíz; Guerogui Karpechenko, Nikolai Maximov y Grigori Levitski, entre un conjunto de miles de colaboradores, biólogos, ingenieros agrónomos, técnicos, etc., repartidos por toda la URSS.

En 1923 fue elegido miembro de la Academia de Ciencias. Desde entonces y hasta 1929, ostentó también el cargo de director del Instituto Estatal de Agronomía Práctica, y desde 1930 hasta 1940, del Instituto de Genética de la Academia de Ciencias de la URSS. Ya en 1926 recibió el Premio Lenin por sus méritos al frente del VIR, particularmente por sus investigaciones sobre el origen de las plantas cultivadas. Vavilov presidió también entre 1929 y 1935 la Academia Rusa de Ciencias Agronómicas V.I. Lenin y fue vicepresidente desde 1935 hasta 1940. Asumió además la presidencia de la Sociedad Geográfica de la URSS entre 1931 y 1940. Entre 1926 y 1935 fue miembro del Comité Ejecutivo Central de la Unión Soviética, y fue elegido en varias ocasiones miembro del Comité Ejecutivo Central Pansoviético y del Consejo de Diputados de los Trabajadores de Leningrado. Acumuló además una larga lista de distinciones internacionales: miembro de la Royal Society de Londres, de la Sociedad Real de Edimburgo, miembro honorífico de la Academia India de Ciencias, de la Real Sociedad Española de Ciencias Naturales, y un largo etcétera.

3. El instituto contó desde el principio con todo el apoyo gubernamental y Vavilov puso en marcha una impresionante estructura institucional de investigación científica y productiva que condujo a la creación del primer Museo mundial de plantas cultivadas, una de las mayores aportaciones a la historia de la agricultura mundial. Con cuatrocientas estaciones experimentales de investigación repartidas por toda la URSS, en 1940 la colección mundial del VIR contaba ya con 250.000 muestras. En un artículo de 1940 titulado “Introducción de plantas durante la era soviética”, decía Vavilov que entre 1930 y 1940, su instituto había distribuido hasta cinco millones de paquetes de semillas a instituciones agrícolas de investigación y mejora. El instituto y sus estaciones de investigación pusieron en producción doscientas cincuenta y cuatro nuevas variedades, desde cereales estables como el trigo, el centeno, la cebada y la avena hasta plantas medicinales.

Para llevar adelante este proyecto propio de un estado socialista como la Unión Soviética, se organizaron y financiaron 140 expediciones a toda la URSS y más de 40 expediciones por todo el mundo, en las que Vavilov y diferentes equipos de exploradores visitaron sesenta y cuatro países. Muchos de estos viajes fueron relatados en su libro, *Cinco continentes* (Vavilov, 1987); libro que Vavilov no pudo completar pero que recoge parte de las notas que dejó y algunos textos

publicados de modo independiente, como el que narra su viaje por España (Vavilov, 1937; Huerga, 2023).

La Ley de las Series Homólogas predecía la existencia de variedades desconocidas que podían ser rastreadas sistemáticamente por todo el mundo y permitía guiar las rutas de aquellas expediciones en busca de la ubicación de estos reservorios naturales. Así llegó al establecimiento de su teoría más original y revolucionaria: la Teoría de los siete centros de origen de las plantas cultivadas. Según ella, estos centros se localizarían en varias áreas geográficas relativamente pequeñas y distribuidas por todo el planeta, especialmente en zonas montañosas aisladas. La idea de la localización geográfica de los centros independientes de origen de las plantas cultivadas a partir de la mayor variabilidad genética deducida de la ley de las series homólogas, junto con el estudio de sus cepas silvestres y la historia de sus migraciones, se fue consolidando a medida que se completaba el programa de sus expediciones. La ONU reconoce hoy los Centros Vavilov como zonas protegidas de alta diversidad. Como decía su hijo Yuri: “ni siquiera las colecciones más ricas pueden reemplazar los bancos naturales de genes”.

“En Asia distinguimos –decía Vavilov– tres centros fundamentales de formación de especies. Primero, el Suroeste de Asia, incluyendo el interior de Asia Menor, Persia, Afganistán, Turkestán y la India noroccidental. Aquí está el hogar del trigo suave, del centeno, del lino, de la alfalfa, del trébol persa (*Trifolium resupinatum* L.), de diversos árboles frutales europeos (manzana, pera, *Prunus divaricata* L., granada, membrillo, guindas), de uvas, y de diversos vegetales”. El segundo centro se localizaría en la India, Indostán y zonas colindantes. Allí es posible aún observar el arroz en su primer estadio como planta silvestre, además de la caña de azúcar, el mango, etc. El tercer centro se localizaría en la montaña central y oriental de China. De allí proceden los cítricos, el melocotón, el té de arbusto, el moral y otras. “El cuarto centro mundial abarca los antiguos países bañados por el Mediterráneo”, con pocos cultivos autóctonos, a pesar de su importancia: el olivo, el algarrobo, la higuera, entre otros. “El quinto centro mundial se encuentra situado en la montaña oriental de África, principalmente en la montaña de Abisinia”. Este centro, aunque tiene un número pequeño de plantas cultivadas independientes, presenta una extraordinaria diversidad, por ejemplo, en variedades de trigo, cebada, y sorgo de grano. Abisinia es el hogar de la planta de café, así como de la cebada y el lino. “En el Nuevo Mundo deben distinguirse dos centros principales. El del sur de México y América Central y el de Perú y Bolivia”. El primero de ellos ha dado nacimiento a cultivos como el maíz, el cacao, el agave, la judía, la papaya, y otros; mientras que “Perú y Bolivia son el hogar de la patata, el árbol de la quina, el arbusto de la coca”. “Estos son los siete centros principales del mundo, que han dado lugar a toda la agricultura mundial”. Como se puede ver en el mapa de la **Figura 3**, estos centros ocupan un territorio muy limitado.

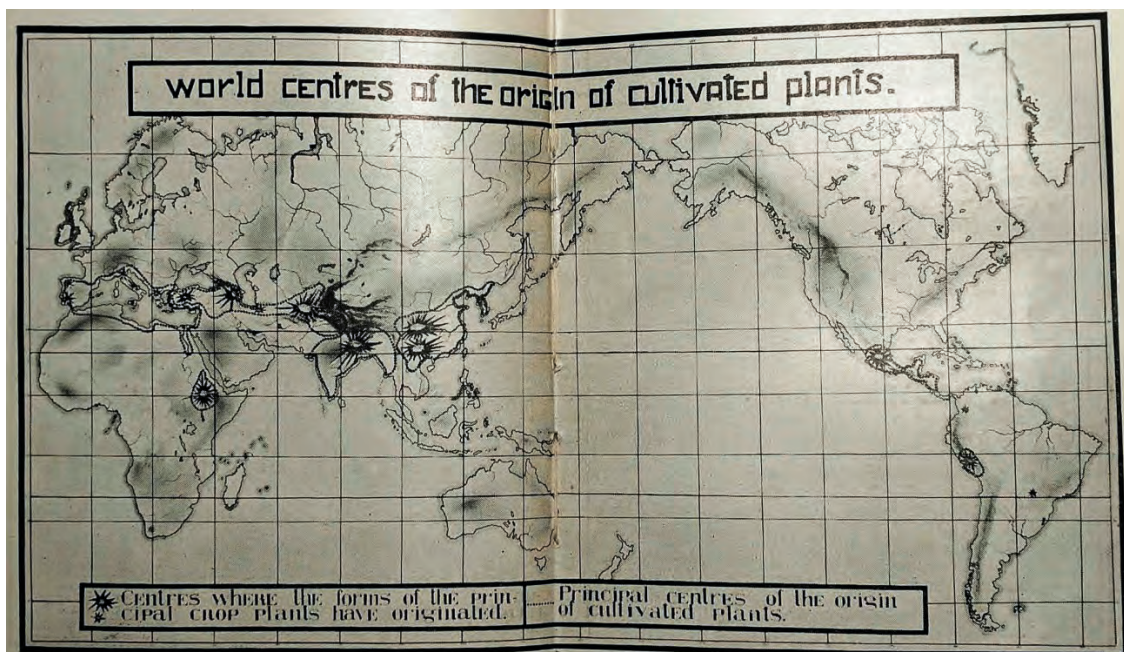


Figura 3. Mapa publicado en *Science at the Crossroads* (Bukharin, 1931) que recoge los siete centros de origen de las plantas cultivadas.

Las expediciones, planificadas con el fin de alcanzar, recoger y recuperar la mayor diversidad de plantas cultivadas, pretendían además preservar y aprovechar el potencial productivo escondido en la complejidad de la diversidad natural. Buscaban comprobar y confirmar las hipótesis de partida de Vavilov, al tiempo que ofrecían la posibilidad práctica de mejorar por métodos científicos la producción agrícola en todos los sentidos: resistencia a las enfermedades, mayor productividad, menor impacto ambiental, industrialización de los procesos productivos y, por supuesto, mejoras en la distribución, almacenamiento, conservación y acceso a la comida por parte de la población soviética.

Con la creación del Museo mundial de plantas cultivadas, Vavilov, “el gran sembrador”, estaba contribuyendo decisivamente a la conservación de la flora y la fauna mundial. Nunca antes se había hecho nada parecido, y nunca después habría sido posible hacerlo. El “Indiana Jones de la Biología”, con su sombrero fedora, consiguió viajar a lugares en los que la vida diaria seguía anclada en el pasado y encontrarse con verdaderos tesoros botánicos y etnográficos que documentó extensa y detalladamente. El turbocapitalismo y la globalización no habían arrasado aún con las formas de producción agrícola tradicionales. Muchos de aquellos viajes fueron auténticas aventuras al más puro estilo cinematográfico, desde su viaje al Pamir hasta su viaje por Sudamérica, pasando por Afganistán o Argelia y el norte de África, donde sufrió un accidente de aviación en medio del desierto, o Abisinia, donde vivió escenas de gran tensión en medio

de las montañas (Golubev, 1988). Sus relatos son, en este sentido, absolutamente impresionantes.

Ahora, después de un siglo de agricultura industrializada y masificada, después de haber arrasado con muchas de las variedades locales tradicionales, después de que la lógica del capitalismo haya conducido a engendros como las semillas “Terminator”, modificadas genéticamente para que originen plantas estériles, incapaces de reproducirse, resulta que hay un lugar en San Petersburgo adonde cualquier país del mundo puede acudir para recuperar, entre sus tesoros, las semillas de sus plantas autóctonas, recogidas por la mano experta de Vavilov y sus colaboradores, y custodiadas incluso en las condiciones más adversas. Como cuando el ejército alemán sitió Leningrado desde 1941 a 1944, un total de 873 días, provocando una hambruna desesperada en toda la población de la ciudad. La estación de investigación Pavlovsk, en Pushkin, tuvo que ser evacuada antes de que llegara el comando de las SS para la recolección de recursos genéticos. Este comando, dirigido por el teniente Heinz Brücher, botánico y genetista, que murió en 1991 asesinado de un disparo en su finca en Mendoza, Argentina, tenía como objetivo hacerse con este tesoro mundial.

Los nazis se apoderaron de parte de la gran colección soviética en el saqueo de estaciones experimentales en Ucrania y Crimea, donde se replicaban las semillas custodiadas en la colección de Leningrado. En todo caso, las más de cien mil muestras de semillas de Pushkin, con un peso de cinco toneladas, se trasladaron al edificio del VIR. La colección sufrió a su vez el asedio de la desesperada población de la ciudad. Muchos de aquellos trabajadores del VIR que custodiaron la colección llegaron a morir de hambre, entre ellos, el especialista en cacahuetes, Alexander. G. Stchukin, la encargada de la colección de avenas, Liliya M. Rodina, el especialista en arroz, Dimitri S. Ivanov, Abraham Kameraz, Olga A. Voskresenskaia, que murió en el sótano donde se guardaban las colecciones de patatas, antes de rendirse a la tentación de alimentarse con aquellos tesoros botánicos (Krivchenko y Alexanyan, 1991; Esquinas, 2013; Loskutov, 1999 y 2021). Al parecer, la sede del VIR se salvó de las bombas porque se encontraba muy cerca del consulado alemán y del hotel Astoria, donde Hitler pretendía celebrar el banquete de la victoria.

4. En agosto de 1927, tras completar su viaje por España, se produjo la primera señal de una de las polémicas más devastadoras en la historia de la ciencia soviética: el enfrentamiento entre Lysenko y Vavilov que hizo de Vavilov un mártir de la Genética. El 7 de agosto, el diario Pravda publicó un elogioso artículo sobre Lysenko, presentándolo como un joven científico “descalzo”, ajeno al mundo universitario. El artículo iba acompañado de un velado ataque contra Vavilov, su colección mundial de semillas y los profesionales de su instituto; y daba cuenta de las investigaciones sobre la vernalización que desde 1925 estaba llevando a cabo Lysenko en la estación experimental de Korovabad, en Azerbayán. Desde

entonces, el destino de Vavilov estuvo marcado por la polémica científica originada en el seno de la biología soviética entre los neo-lamarquistas, que acabarían siendo liderados por Lysenko, y los genetistas, liderados por Vavilov, acerca del papel de los genes en la conformación de las especies biológicas.

La vernalización, una práctica ya conocida en la actividad agrícola, mostraba la importancia de las condiciones ambientales para la mejora de la producción. Partía de que es posible controlar el proceso de floración de una planta y acelerarlo o retardarlo según su exposición al frío. Vavilov la apoyó como una aportación perfectamente válida. Por otro lado, la hibridación, que Vavilov había mostrado en España a investigadores como Azanza Azcona y Luis Crespí (Hueriga, 2023), se fundaba en la teoría genética de Mendel. No eran ni podían ser prácticas incompatibles desde el punto de vista de la genética, pero la confusión teórica e ideológica, el oportunismo y el contexto del sistema político y judicial soviético, transformaron la biología soviética en un campo de batalla ideológico de consecuencias desastrosas.

Vavilov invitó a Lysenko al Primer Congreso Soviético de Genética, Selección y Cría de Plantas y Animales que se celebró en 1929, en el marco del Primer Plan Quinquenal. Su trabajo sobre vernalización recibió una réplica contundente del biólogo Nikolai Maximov que consideraba más importante el control del número de horas de luz que la temperatura. En el verano de ese mismo año Lysenko puso en conocimiento de la prensa el experimento que había llevado a cabo su padre, siguiendo sus instrucciones, en su finca particular de Karlovka, en Ucrania. El éxito de aquel experimento fue objeto de dudas razonables (Medvedev, 1971), pero la prensa soviética se hizo eco proclamando con optimismo la posibilidad de controlar la naturaleza a voluntad, y convirtió a Lysenko en el paradigma de científico soviético frente a los científicos “burgueses herederos del zarismo”, como el propio Vavilov.

Coincidió esto con el inicio de la llamada “Gran Ruptura con el pasado” en el frente cultural, un programa dirigido contra los profesores “burgueses”, los científicos e historiadores procedentes del período prerrevolucionario, además de los *kulaks*, que supuso arrestos y deportaciones masivas por toda la URSS. Hasta entonces, la agricultura había sido gestionada por cada una de las repúblicas soviéticas bajo los principios de la NEP (la Nueva Política Económica que inspiró a Keynes). En agosto de 1929 se creó el Comisariado del Pueblo para la Agricultura de la URSS y se puso en marcha la colectivización masiva –retratada en la película de 1930, *Tierra (Zemlya)*, de Alexander Dovzhenko. Se esperaba que la colectivización paliaría los graves problemas de producción, pues en 1927 se habían perdido cinco millones de hectáreas de trigo de invierno, principalmente en Ucrania, y al año siguiente siete millones de hectáreas. Las denuncias por sabotaje, ya de por sí habituales, aumentaron. El 11 de marzo de 1930 la OGPU (predecesor de la NKVD y la KGB) abrió un archivo especial sobre Vavilov (No. 00654). En él se le identificaba como el líder de un grupo antisoviético que estaría saboteando la producción.

Una nueva amenaza de hambruna en 1931 condujo al gobierno a decretar que las granjas reemplazaran sus cultivos con nuevas semillas que debían estar listas en dos años. Vavilov solicitó más tiempo, afirmando que se necesitarían nueve o diez años para obtener nuevas semillas productivas. Lysenko aprovechó la ocasión y en el verano de 1934 declaró que había incrementado un 40 por ciento la producción del trigo en Odessa usando su método de la vernalización. El comisario Yakovlev ordenó ensayos masivos de cultivos vernalizados en varias regiones. Y comenzaron los arrestos de miembros del equipo de Vavilov; entre ellos, Viktor Pisarev, subdirector del VIR, Grigorii Levitski, y Nicolai Maximov, el primer científico que había criticado la propuesta de vernalización de Lysenko en el congreso de 1929. Ya en una carta dirigida a Stalin alrededor del año 1933 por la OGPU, se proponía el arresto inmediato de Vavilov.

Lysenko encontró por aquel entonces el apoyo del filósofo Isaak Prezent, que le ayudó a fundamentar el creciente conflicto institucional (fue el inventor del slogan “Babilonia debe ser destruida”). Los discursos de Lysenko se llenaban de referencias insidiosas a los “científicos burgueses”, a los saboteadores, y a los enemigos de clase. Los científicos y académicos burgueses “observan y explican los fenómenos”, mientras que la ciencia socialista lo que pretende es alterar el mundo animal y vegetal a favor de la construcción de la sociedad socialista. En 1934 fue invitado a exponer sus propuestas en el Kremlin. En su comparecencia, advertía que los enemigos no solo estaban entre los *kulaks*, sino también en la ciencia. “La lucha de clases se vive también en la vernalización”, y sugería con falsa modestia que quienes criticaban sus métodos acaso pudieran considerarse saboteadores, incluso aunque fueran científicos. Un simple *vernalizador* como él, sufría los ataques de los teóricos académicos. En aquella conferencia también estaba presente Vavilov, pero renunció a enfrentarse abiertamente con él.

Una carta fechada el 27 de marzo de 1935, y firmada por S. Klimov y A. Bondarenko, vicepresidente de la Academia Lenin, acusaba a Vavilov de no ser un verdadero bolchevique, llenaba de sospechas sus viajes y sus proyectos científicos y advertía que en el Instituto podría haber agentes dobles, saboteadores y elementos hostiles de clase. La carta, que conserva las notas hechas por Stalin, hizo que en pocas semanas se reorganizara la Academia Lenin de Agricultura, rebajando a Vavilov a la condición de vice-presidente. A su vez, Lysenko y Prezent reforzaban sus propuestas lamarquistas rechazando la teoría genética y en defensa de la idea de que un organismo está en cambio continuo en función del ambiente. Rechazaban también la idea de los genes y la propia teoría mendeliana. Con el respaldo de Molotov desde el gobierno, era condecorado con la Orden de Lenin, mientras denunciaba ante Yakolev, el Comisario de Agricultura, que había científicos que criticaban como incorrectos sus métodos, entre ellos nombraba entre otros a Karpechenko y a Vavilov.

5. En 1936 ya se había definido plenamente el enfrentamiento entre las dos doctrinas de la biología soviética, la genética mendeliana y el neolamarquismo de Lysenko, que recibía el apoyo institucional y la cooperación del aparato represivo del terror para destruir a la oposición científica, con el fin de entregar todas las instituciones al control de sus seguidores (Joravsky, 1986). Así ocurrió en diciembre de 1936, cuando se organizó el Congreso de la Academia Lenin de Agricultura para discutir de nuevo ambas posturas. Antes de iniciar el congreso fue arrestado uno de los más brillantes genetistas, Israel Agol, que había trabajado en Texas en 1931 con Herman Muller y que había criticado abiertamente a Lysenko. Agol, vinculado a la escuela de los “dialécticos” de Deborin, murió ejecutado por trotskista el 8 de marzo de 1937.

Vavilov confiaba en que la Conferencia Internacional de Genética, prevista para 1937 en Moscú, con más de 700 delegados confirmados y 1500 previstos, sirviera para legitimar la genética soviética ante el mundo y consolidar su posición. Pero Stalin canceló el evento, que finalmente se celebró en Edimburgo. La prensa atacaba sin descanso a los genetistas. El propio comisario de Agricultura, Yakovlev, los acusaba de racistas. Los lamarquistas adoptaron también la memoria de otro de los grandes biólogos soviéticos darwinistas como refuerzo a su autoridad, Kliment Timiriazev, figura muy respetada, que en algún momento había afirmado que la genética mendeliana era una intrusión clerical y nacionalista en la ciencia, de modo que la opinión pública empezaba a ver a los genetistas como antidarwinistas. Cada uno trataba de zafarse como podía. Tal fue el caso de Nicolai Gorbunov, el secretario personal de Lenin que, como secretario permanente de la Academia de Ciencias, acusó a Vavilov de alinearse con las teorías fascistas de la genética, lo que no evitó que fuera fusilado el 7 de septiembre de 1938. Y lo mismo le ocurrió al principal organizador de la colectivización agraria soviética, Yakov Yakovlev, fusilado el 29 de julio de 1938 por derechista y trotskista, a pesar de dar todo su apoyo a Lysenko, encomendando la creación del departamento para la vernalización en el Instituto de Genética de Odessa, donde desarrolló Lysenko parte de su trabajo; Alexander Muralov, que había reemplazado a Vavilov como presidente de la Academia Lenin, fue destituido, asignando su puesto a Lysenko quien, desde la primavera de 1938, se convertía en jefe directo de Vavilov.

La NKVD amplía los informes y en diciembre de 1938 abre una nueva carpeta (300669) con el nombre de “Genetika”. Una vez más, el primer documento de esta carpeta, firmado por Bogdan Kovulov, solicitaba a Beria, jefe del NKVD, que Vavilov fuera arrestado inmediatamente. Poco después, Lysenko era elegido miembro de la Academia de Ciencias de la URSS. Ya tenía suficiente poder para reorganizar todas las instituciones que estuvieran todavía al servicio de los proyectos científicos de Vavilov.

Para consolidar su poder, en octubre de 1939 el Comité Central convocó una reunión para debatir de nuevo las dos posiciones fijadas en la confrontación entre el Instituto de Leningrado y el Instituto de Odessa, tal y como comentaba el propio Vavilov, que decía: “Debe hacerse notar que la posición de Leningrado

es también la de la ciencia del mundo contemporáneo”. El fórum estaba dirigido por el filósofo Mark Mitin, director del Instituto de Marxismo-Leninismo, dependiente del Comité Central del Partido Comunista de la Unión Soviética, que resumió el debate en estos términos: “El Lysenkoismo es una ciencia progresiva, mientras que la Genética es una ciencia reaccionaria”. La revista *Bajo las banderas del marxismo* recogió los resultados de la reunión y le dio a Lysenko la aprobación del partido. Lysenko ya podía ir desmantelando toda la obra de Vavilov. Bloqueó la publicación de sus libros y prohibió mostrar los resultados de sus investigaciones. Entre 1939 y 1940 reemplazó a todo el consejo científico del instituto de Leningrado, entre ellos a Karpechenko, que había regresado de EEUU por lealtad a la URSS.

Vavilov continuó trabajando con una convicción inquebrantable. En una carta a su colega Herman Muller le decía: “Nuestros oponentes son prácticamente neolamarquistas... no tienen datos experimentales... es principalmente una cuestión de fe. Sin embargo, se consideran darwinistas. La única manera que tenemos ahora es mostrar una y otra vez definitivamente la importancia de la moderna genética para los cultivos”. En aquel momento su obra alcanzaba cotas incuestionables. Desde 1930, junto con 80 colaboradores, estaba preparando una revisión botánica completa en 22 tomos titulada *La Flora cultivada en la URSS*. Para 1940 se habían publicado ya siete volúmenes, con trabajos monográficos sobre cereales, legumbres, frutas; era solo uno de los muchos y prometedores proyectos editoriales en los que trabajaba el equipo de Vavilov.

6. Parece ser, según algunas fuentes, que Vavilov pudo haber tenido una audiencia con Stalin el 20 de noviembre de 1939, aunque no hay registros, salvo el testimonio de Yefrem S. Yakushevsky, que trabajaba en el VIR. En ella, le habría dicho Stalin: “¿cuánto tiempo más vas a seguir con flores y esas tonterías? ¿Cuándo empezarás a aumentar la producción agrícola?

Con el pacto Molotov-Ribbentrop, la URSS había recuperado los territorios del este de Ucrania. En mayo de 1940 se le encomendó a Vavilov llevar a cabo una expedición botánica por estos territorios, desde Lvov hasta los Cárpatos. El mismo día 23 de julio en el que se le autorizaba el viaje a Ucrania, firmaba Beria la orden para su arresto. Antes de iniciar su viaje, Vavilov fue al despacho de Lysenko. Por las voces que se oyeron parece que Lysenko estaba al tanto de todo. Salió de Moscú en tren con sus colaboradores Vadim Lejnovich y Fatij Bajteiev (Bajteiev, 1960). El 5 de agosto llegaron a la antigua ciudad ucraniana de Chernovtsy y al día siguiente comenzaron la exploración por las montañas de los Cárpatos. Parece ser que Vavilov volvió a encontrar de nuevo la escanda (otra variedad, no la espelta asturiana que vino a recoger a España). Al regresar al hotel universitario donde se alojaban, varios agentes de la NKVD le estaban esperando. Le dijeron que se requería su presencia urgente en Moscú. Partieron de inmediato. El día 10 de agosto lo encarcelaron en la Lubianka.

Al día siguiente del arresto, agentes del NKVD registraron el apartamento de Moscú, el apartamento de Leningrado y la dacha de la granja experimental del Instituto en Puskin. También registraron la oficina de Vavilov en el Instituto de Leningrado y en el Instituto de Genética de Moscú. Según la NKVD, sólo en Leningrado confiscaron archivos con más de dos mil quinientas páginas de manuscritos científicos en diecinueve carpetas. De su apartamento en Puskin tomaron también documentos, cartas, telegramas, libretas con notas y direcciones, y una caja de placas fotográficas. Sólo comenzó a saberse que había sido apresado cuando el 12 de agosto regresaron a San Petersburgo Lejnovich y Bajteiev. Su hermano, Serguei Vavilov, su hijo Oleg y su viejo profesor en el Petrovka, Dmitry Prianisnikov, intentaron infructuosamente que saliera de la cárcel.

El interrogatorio comenzó el mismo día que entró en la cárcel, a las 23:35, y terminó a las 2:30 de la madrugada. Había sido detenido bajo el conocido artículo 58, por crímenes de estado, según el Código Penal soviético, que incluía cargos como traición a la patria y sabotaje. Fueron en total mil setecientas horas de interrogatorios, con sesiones de hasta 13 horas. Se registraron y transcribieron al menos cuatrocientos interrogatorios, aunque no hay modo de saber si lo que se registró ahí como declaraciones de Vavilov eran verídicas (Popovski, 1984; Vavilov, 2004). Una semana después de su arresto se le hizo la fotografía oficial que hoy se puede ver en Internet de perfil y de frente (**Fig. 4**). En esos días llegó a escribir a Beria declarando que él nunca había traicionado a su patria. Durante las dos primeras semanas los interrogatorios solían hacerse de noche. Finalmente, en la noche del 24 al 25 de agosto Vavilov admitió por primera vez su culpabilidad: “Me declaro culpable de ser miembro de una organización derechista que existe en el sistema del Comisariado de Agricultura de la URSS desde 1930”.

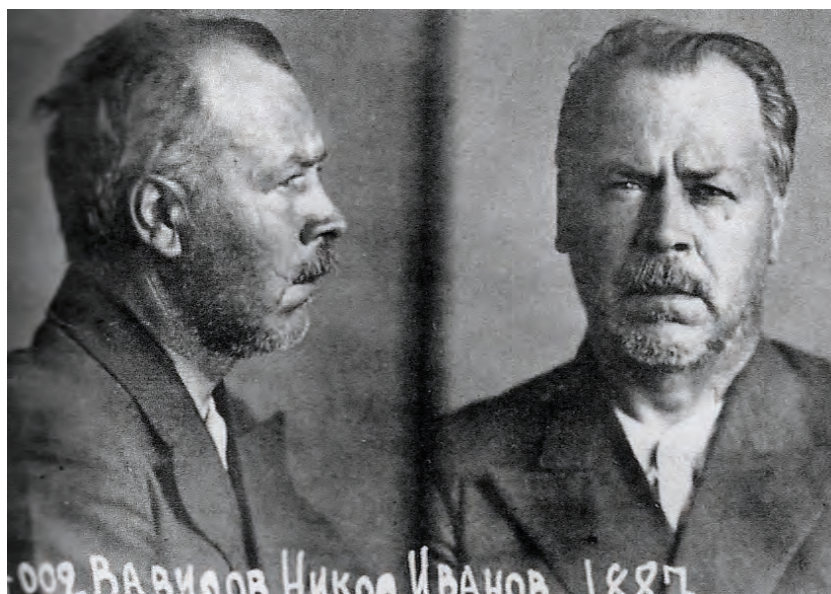


Figura 4. Fotografía de Vavilov después de su arresto en agosto de 1942.

En el mes de octubre, consiguieron que confesara también su pertenencia al conocido como “Partido de los campesinos contrarrevolucionarios”, un ficticio grupo inventado seguramente por los propios servicios secretos para encubrir los fracasos en la política económica durante el primer plan quinquenal. También consiguieron algunos nombres, entre ellos, el de su amigo Karpechenko, con quien los interrogadores llegaron a organizar en la primavera de 1941 un sádico cara a cara. También en 1941 el interrogador principal, Khvat, solicitó una comisión de expertos para revisar las implicaciones científicas de las respuestas de Vavilov a los interrogatorios. El responsable de dicha comisión era el inmediato jefe de Khvat, el Mayor Stepan Shundenko, que precisamente había trabajado en el VIR infiltrado para informar de lo que allí ocurría. La lista de los responsables de dicha comisión tenía el aval de Lysenko, lo que demuestra que estaba detrás de todo el proceso contra Vavilov. Quince años después, durante su rehabilitación, uno de aquellos expertos, Ivan Yakushkin, botánico informador sobre Vavilov desde 1930, reconoció el fraude de todo el proceso.

El 22 de junio de 1941 Alemania invadió la Unión Soviética. El 29 de junio Khvat completó su dossier y lo envió al fiscal. Todo el material requisado en los apartamentos y despachos de Vavilov, a excepción de algunos documentos que podían servir para acusarle de algo, todo su material de viajes, en noventa y dos carpetas, noventa libretas, fotografías, libros, revistas, periódicos, mapas y cartas, todo fue destruido.

El 9 de julio, en cinco minutos, los tres generales del Colegio Militar de la Corte Suprema de la URSS encontraron y declararon a Vavilov culpable de todos los cargos, incluyendo el de espionaje. La sentencia firme e inapelable lo condenaba a fusilamiento y a la confiscación de todos sus bienes por varios delitos tipificados en el artículo 58 del Código Penal de la RSFSR.

Vavilov envió una carta al Presidium del Soviet Supremo solicitando el perdón y ofreciéndose para colaborar en beneficio de la agricultura socialista de la patria. Su petición (nº 283) fue rechazada y fue transferido a la prisión de Butirskaya, donde se aplicaría la sentencia de muerte. Karpechenko también fue transferido y ejecutado inmediatamente. Escribió una petición personal de clemencia a Beria. Pocas semanas después recibió la visita de un enviado de Beria informándole de que el Presidium del Soviet Supremo había acordado reducirle la pena y que sería transferido a otra cárcel de la NKVD, pero antes de que el proceso pudiera concluirse hubo que evacuar Moscú, amenazada por los nazis.

La evacuación de miles de presos políticos se hizo el 16 de octubre de 1941 desde la estación de Kursk. Vavilov estaba destinado a Orenburg, pero finalmente los ataques alemanes forzaron que el tren se desviara hacia Saratov. Allí fue encarcelado en la Prisión número 1, situada en la calle Astrakán. El edificio se conocía popularmente con el nombre de *El Titanic*.

Acabó en la misma celda sin ventanas que el filósofo Iván Luppul, compañero de Boris Hessen (Hurga, 1999), especialista en Diderot, y el ingeniero

Iván Filatov. Popovski, el periodista que escribió *The Vavilov Affair* (1984), llegó a conocer a un conductor de camiones en Saratov que a su vez había oído a Filatov describir las condiciones que sufrieron en “el corredor de la muerte”. Gracias a este testimonio sabemos que los tres profesores se organizaron como pudieron para sobrevivir en aquella estrecha y fría celda del sótano cuya bombilla permanecía encendida las veinticuatro horas del día. Organizaron conferencias y tertulias sobre historia, biología y sobre la industria de la madera. La salud de Vavilov empeoraba por momentos. A finales de 1941 fue ingresado en la enfermería de la prisión, donde tuvo lugar un curioso episodio. Una joven de dieciséis años llamada Irina habló con él. Vavilov le dijo quién era y le pidió que recordara su nombre y su condena, porque suponía que ella sobreviviría.

El 25 de abril de 1942 envió otra súplica a Beria. En ella, Vavilov informaba que durante su estancia en la prisión de Moscú había llegado a escribir un libro cuyo título era *Historia de la Agricultura Mundial*. Este libro, lamentablemente, no se ha conservado. Finalmente, el 4 de julio de 1942, Luppol y Vavilov recibieron aviso de que sus sentencias de muerte habían sido conmutadas a 20 años en un campo de trabajo y fueron trasladados a una celda general donde podrían hacer ya algo de ejercicio e incluso bañarse. Luppol fue enviado al campo de concentración de Temlag, donde murió el 26 de mayo del 43, pero Vavilov tuvo que afrontar otro otoño y otro invierno en la cárcel.

No hubo notificación, llegó el invierno, y el hambre, la miseria, las infecciones, la malnutrición, las torturas y las penosas condiciones de vida en la cárcel lo llevaron al desenlace final. El día 26 de enero de 1943 murió Vavilov en el hospital de la cárcel de Saratov, supuestamente, tal como firmaron la enfermera y la médica, por neumonía; realmente, por distrofia por una malnutrición prolongada. Su cuerpo, enterrado en una fosa común en el cementerio Voskresensky en Saratov, no se pudo identificar, a pesar de las pesquisas de su hijo Oleg que viajó hasta allí en octubre de aquel mismo año. Así murió el científico que soñaba con acabar con el hambre en el mundo.

Irónicamente, su hermano Sergei Vavilov fue nombrado presidente de la Academia de Ciencias de la URSS en 1945, mientras que Oleg, el primogénito de Vavilov, moría en enero de 1946 en extrañas circunstancias, en las montañas del Cáucaso. Lysenko no se daba por satisfecho. Todavía en 1948 consiguió aplastar la poca resistencia que ofrecían ya sus oponentes genetistas en la famosa Sesión de la Academia Lenin de Ciencias Agrícolas. Sergei Vavilov murió de un infarto el 25 de enero de 1951 sin llegar a ver cómo se rehabilitaba la memoria de su hermano, cuando el 20 de agosto de 1955 el Colegio Militar de la Corte Suprema de la Unión Soviética lo declaró inocente de todos los cargos. En 1967 el VIR fue renombrado como Instituto Vavilov de toda la Unión para la Industria de las Plantas (**Fig. 5**). Cuenta Loren Graham que en 1971 se encontró con Lysenko en la cafetería de la Academia de Ciencias en Moscú. Al verlo, Lysenko se puso a negar históricamente haber matado a Vavilov. Murió en 1976.

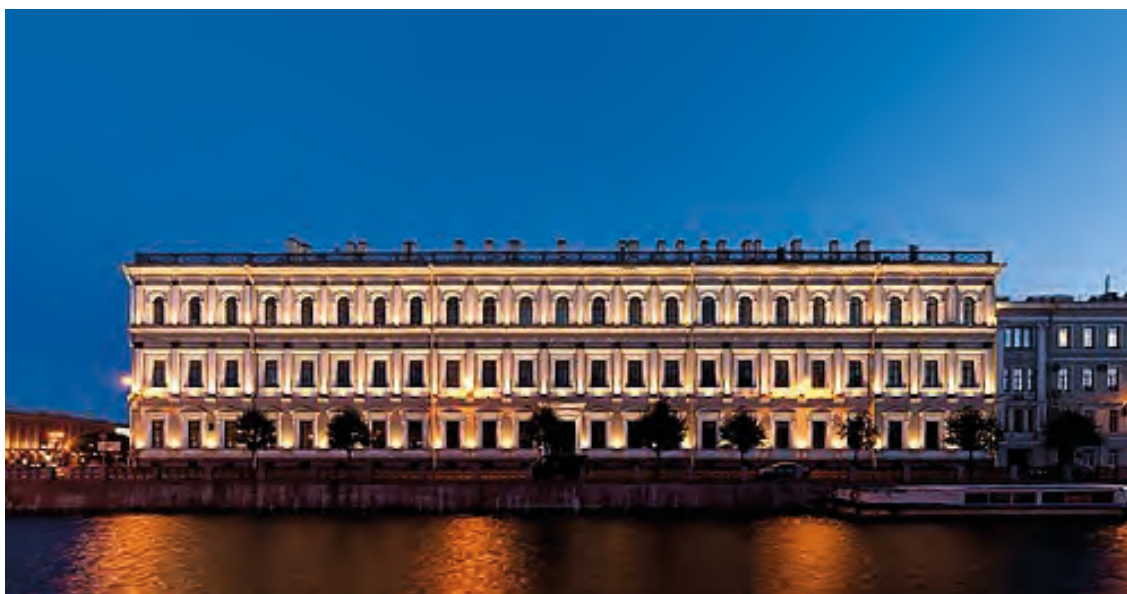


Figura 5. Instituto de Investigación Panruso N.I. Vavilov de la Industria de las Plantas. Ubicado en San Petersburgo, antes Leningrado, es un centro de investigación y también un banco de genes.

Bibliografía

- Bajteiev, F. H. (1960). Polba (*Triticum dicoccum* Schübl) encontrada por N. I. Vavilov en los Cárpatos. En *Memoria sobre la evolución, la biogeografía, la genética y la cría: Colección dedicada al 70 aniversario del Académico N. I. Vavilov* (pp. 59–60). Moscú: Ed. de la Academia de Ciencias de la URSS.
- Bukharin, N. I. (Ed.). (1931). *Science at the Crossroads: Papers Presented to the International Congress of the History of Science and Technology*, London, 1931. London: Kniga.
- Esquinas Alcázar, J. (2013). Biodiversidad y seguridad. *Cuadernos de Estrategia*, 161, 109–156. Madrid: Ministerio de Defensa.
- Golubev, G. (1988). *Nikolai Vavilov, el gran sembrador*. Moscú: Mir.
- Huerga Melcón, P. (1999). La ciencia en la encrucijada. Pentalfa eds.
- Huerga Melcón, P. (2023). *Vavilov en España. Una odisea en busca de la escanda*. Rema y Vive.
- Joravsky, D. (1986). *The Lysenko affair*. Chicago: University of Chicago Press.
- Krivchenko, V. I., & Alexanyan, S. M. (1991). Vavilov Institute scientists heroically preserve world plant genetic resources collection during World War II siege of Leningrad. *Diversity*, 7(4), 10–13.

- Loskutov, I. G. (1999). *Vavilov and his Institute: A history of the world collection of plant genetic resources in Russia*. Roma: International Plant Genetic Resources Institute.
- Loskutov, I. G. (2021). *Vavilov and his Institute: A history of the world collection of plant genetic resources in Russia*. Roma: International Plant Genetic Resources Institute.
- Medvedev, Z. A. (1971). *The rise and fall of T. D. Lysenko*. Nueva York: Anchor Books.
- Perejón, A., & Moreno-Eiris, E. (2006). Arqueociatos de España: Bioconstrucciones y puesta al día de la sistemática y la bioestratigrafía. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geológica)*, 101(1-4), 105–145.
- Popovsky, M. (1984). *The Vavilov affair*. Connecticut: Archon Books.
- Pringle, P. (2008). *The murder of Nikolai Vavilov: The story of Stalin's persecution of one of the great scientists of the twentieth century*. Nueva York: Simon and Schuster.
- Reznik, S., & Vavilov, Y. (1997). The Russian scientist Nicolay Vavilov. En N. I. Vavilov, *Five continents* (pp. XXVIII). Roma: IPGRI.
- Rozanov A.Y. 1974. Homological variability of archaeocyathans. *Geological Magazine*, 111(2): 107-120.
- Vavilov, N. I. (1920). The law of homologous series in heritable variation. *Trudi III Vserossiiskogo Seleksionnogo S'ezda, Saratov*. (También publicado en inglés como: Vavilov, N. I. (1922). The law of homologous series in variation. *Journal of Genetics*, 12, 47–89).
- Vavilov, N. I. (1937). Моё путешествие в Испанию [Mi viaje a España]. *Новый мир [Novyi Mir]*, 2, 225–253.
- Vavilov, N. I. (1951). La nueva sistemática de las plantas cultivadas. En N. I. Vavilov, *Estudios sobre el origen de las plantas cultivadas* (pp. 167–182, F. Freier, Trad.; O. Núñez, Rev.). Buenos Aires: Acme Agency Soc. Resp. Ltda.
- Vavilov, N. I. (1987). *Пять континентов, Five continents*. Leningrado: Nauka Publishing House, Committee of the USSR Academy of Sciences. http://www.vir.nw.ru/wp-content/uploads/2018/09/Vavilov-5-kontinentov_geneticheskie-resursy.pdf. También publicado como Vavilov, N. I. (2015). Cinco continentes. Bilbao: Libros del Jata y como Vavilov, N. I. (s. f.). Five continents. Roma: International Plant Genetic Resources Institute.
- Vavilov, N. I. (1994–2003). *Научное наследие в письмах. Международная переписка [Patrimonio científico en cartas. Correspondencia internacional]* (Vols. I–VI). Moscú: Nauka. También publicado en Academia de Ciencias de la URSS, Instituto de Historia de la Ciencia y la Tecnología. (1980). Patrimonio científico. Volumen quinto: Nicolai Ivanovich Vavilov. Patrimonio epistolar, 1911–1928. Moscú: Nauka.

- Vavilov, N. I. (2004). El problema del origen de la agricultura mundial a la luz de las últimas investigaciones. *Llull*, 28; 195-208. Traducción de Pablo Huerga Melcón.
- Vavilov, N. I. (2004). Expediciones por España. *Ábaco*, 42, 101–117. (Número especial: *España, ciencia y exilio*). Traducción de Pablo Huerga Melcón.
- Vavilov, N. I. (2009). *Origin and geography of cultivated plants*. Cambridge: Cambridge University Press.

AMBIÓLOGOS DE AQUÍ

Un ambientólogo en AEMET

Sergio Fernández González

Delegado Territorial de AEMET en Cantabria
sfernandezg@aemet.es

Allá por el año 2005, qué lejos y tan cerca, llegaba a León para comenzar el curso en la Licenciatura de Ciencias Ambientales. Desde pequeño siempre me había interesado todo lo relacionado con la naturaleza, así que creo que esa fue la principal motivación para elegir esta carrera. La cercanía con mi lugar de origen, Palencia, hizo que me decantase por la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales de la Universidad de León.

Una de las cosas que más me llamaban la atención de niño era la meteorología, y seguramente unas inundaciones que hubo en el barrio donde vivía pudieron marcar mi futuro profesional. En realidad, lo que más me gustaba era ver nevar, aunque fuese de noche mirando a las farolas. Esto último puede parecer extraño, pero más tarde con los compañeros y compañeras de doctorado me di cuenta de que no era el único con esa afición.

Debido a los efectos de la crisis del 2008, a los que terminamos la carrera en los años siguientes no nos resultó sencillo incorporarnos al mercado laboral. Tras unas prácticas relacionadas con la depuración de aguas residuales, como no conseguí encontrar trabajo, me decanté por cursar el Máster en Energías Renovables, también en la Universidad de León. Al terminar tuve la suerte de incorporarme a trabajar en el Grupo de Física de la Atmósfera de la Universidad de León, como contratado en proyectos de investigación cuya temática me resultaba muy atractiva: estudiar tormentas con granizo en Zaragoza y nieve en la sierra de Guadarrama (**Fig. 1**). La verdad es que fue una experiencia vital en la que aprendí muchísimo, desde poner las cadenas al coche hasta cómo es un radar meteorológico por dentro, incluyendo bastantes conocimientos de bricolaje, necesarios en toda campaña de investigación.

Posteriormente, una beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU) me permitió hacer el doctorado. Aprovechando los datos de las campañas asociadas a los proyectos comentados anteriormente, la tesis se centró en investigar episodios de nevadas y precipitación engelante mediante modelos numéricos de predicción meteorológica. Este tiempo me permitió aprender técnicas estadísticas, tratamiento de datos y programación, que al fin y al cabo son las habilidades que más se valoran en algunos sectores a la hora de buscar trabajo. Además, la beca FPU me facilitó realizar 2 estancias de doctorado en Taiwán, donde me

especialicé en microfísica de nubes y, sobre todo, conocí una cultura completamente diferente.

Tras una temporada como contratado postdoctoral, me decanté por opositar al Cuerpo de Meteorólogos del Estado, para así incorporarme a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en el año 2017. Son unas oposiciones duras ya que el temario está bastante enfocado en física y matemáticas, pero conozco por lo menos 4 biólogos y ambientólogos de la Universidad de León que lo hemos conseguido. Hay 3 oposiciones diferentes en AEMET: observadores (principalmente en aeropuertos o mantenimiento de estaciones meteorológicas), diplomados (predictores en su mayoría) y meteorólogos (tareas diversas, desde desarrollo de aplicaciones o modelos hasta otras más centradas en gestión y administración). Actualmente hay también bolsa de interinos para trabajar como observador/a en aeropuertos principalmente.



Figura 1. Campaña de vuelos experimentales desarrollada por el grupo de Física de la Atmósfera de la Universidad de León junto con el INTA.

Dentro de AEMET he trabajado principalmente en el Grupo de Predicción y Vigilancia de Santander, que está especializado en aeronáutica. Su principal función es proporcionar el pronóstico meteorológico a 10 aeródromos ubicados en el norte de la Península, y está compuesto por un equipo tanto de observadores

como de predictores para dar servicio las 24 horas del día los 365 días del año. Dentro de este grupo de predicción, mis tareas consistían en dar formación, verificar que las predicciones eran precisas y coordinar el equipo.

Desde febrero de 2025 ocupo el puesto de Delegado Territorial de AEMET en Cantabria, encargándome de la coordinación de las distintas unidades de la Delegación (sistemas básicos, relaciones con usuarios, climatología, estudios y desarrollos, oficina meteorológica del aeropuerto y el grupo de predicción y vigilancia anteriormente descrito), que se componen de 30 trabajadores y trabajadoras (**Fig. 2**). Dentro de las tareas de mi actual puesto de trabajo está la atención a los medios de comunicación, especialmente para transmitir la información de los balances climáticos mensuales y estacionales (**Fig. 3**). Desde la Delegación también coordinamos actividades divulgativas en el ámbito universitario, participando en La Noche de los Investigadores y Los Sábados de Ciencia organizados por la Universidad de Cantabria, y enseñando nuestras instalaciones a alumnos desde primaria hasta universitarios que nos lo solicitan.

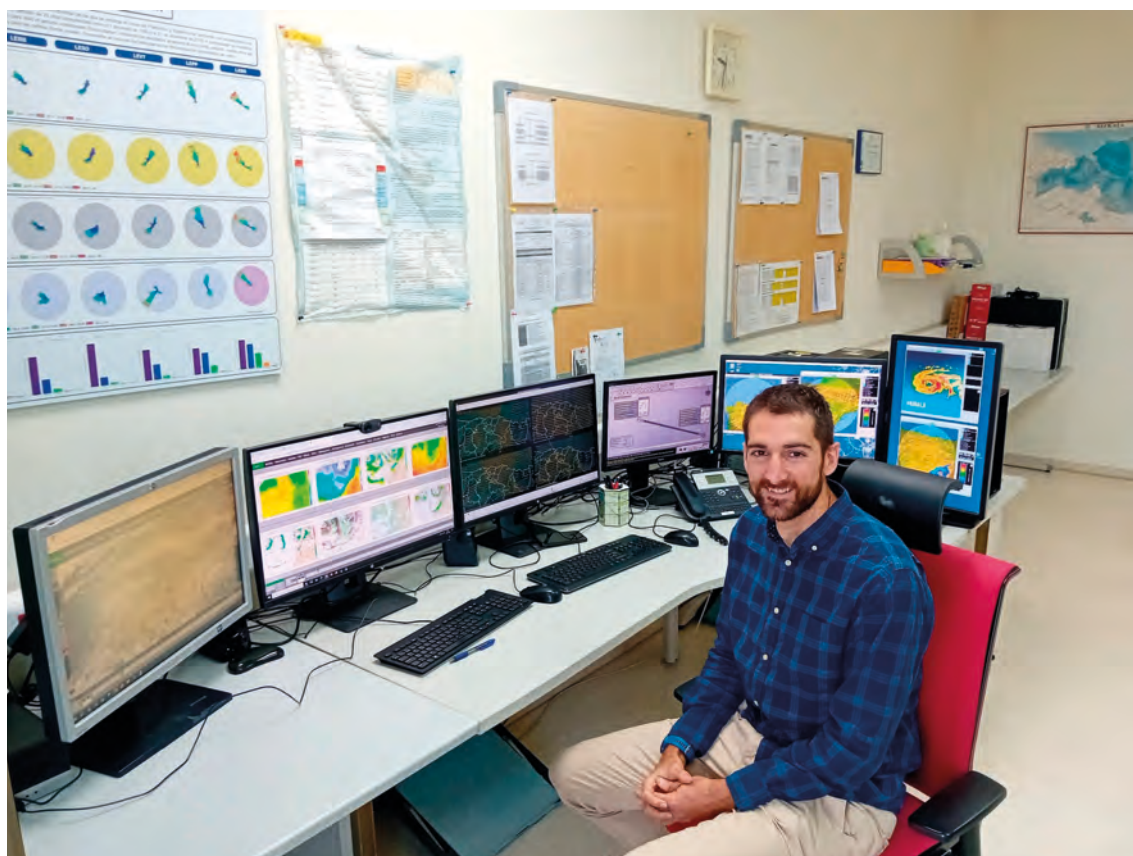


Figura 2. Instalaciones de la delegación territorial AEMET Cantabria.

Sin embargo, la principal responsabilidad es la asesoría meteorológica a Protección Civil cuando se convoca un CECOPI (Centro de Coordinación Operativa Integrado) debido a una inundación o importante nevada (**Fig. 4**). Esta

asesoría no solo se convoca por fenómenos estrictamente meteorológicos, sino que también pueden convocarnos por accidentes químicos o incendios forestales, para lo que resulta de gran ayuda lo aprendido en la licenciatura de Ciencias Ambientales. De hecho, este pasado verano me convocaron ante la amenaza de que entrasen en Cantabria los trágicos incendios que asolaron la provincia de León.

Con esto me gustaría transmitir que lo aprendido en la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, tanto dentro como fuera de las aulas, es realmente útil en la trayectoria personal y profesional que luego cada uno toma. Posiblemente uno de los aspectos más positivos de Ciencias Ambientales es la gran diversidad de materias que aborda, proporcionando una visión global muy útil para el futuro profesional. Así que, aunque el camino no resulte sencillo, con esfuerzo se puede conseguir un trabajo que esté relacionado con nuestros intereses. Ahora os toca a vosotros y vosotras disfrutar de la Facultad que recuerdo con tanto cariño.



Figura 3. Rueda de prensa de Sergio Fernández González, delegado territorial de AEMET Cantabria.



Figura 4. Reunión del CECOPI Cantabria.

MI PROYECTO DE TESIS

Efecto de los incendios forestales extremos sobre la provisión de servicios ecosistémicos. Importancia de la restauración post-fuego

Sara Turiel-Santos ^{1,2}, Ángela Taboada Palomares ^{1,2}, M.^a Leonor Calvo Galván¹

¹ Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental, Área de Ecología, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad de León, E-24071, León, España

² Instituto de Investigación de Medio Ambiente (IMA), Universidad de León, E-24007, León, España

Esta Tesis Doctoral fue desarrollada en el Grupo de Investigación de Ecología Aplicada y Teledetección (GEAT) de la Universidad de León, centrado en el estudio de los incendios forestales y sus efectos sobre los ecosistemas; en concreto en cómo los incendios forestales y la gestión post-incendio afectan a los ecosistemas mediterráneos dominados por *Pinus pinaster*.

En las últimas décadas, especialmente en la cuenca mediterránea, el régimen de incendios ha cambiado debido al abandono rural, la falta de gestión forestal y el cambio climático, provocando más incendios (Sayed *et al.*, 2024). La acumulación de combustible forestal y el aumento de condiciones cálidas y secas han favorecido incendios más frecuentes, extensos y severos (Fernández-García *et al.*, 2023), especialmente en España.

En este contexto, los pinares mediterráneos de *Pinus pinaster* son especialmente vulnerables, y aunque ofrecen servicios ecosistémicos como producción de setas, madera, resina o caza (Taboada *et al.*, 2021), la intensificación de los incendios ha reducido su regeneración natural, poniendo en riesgo dichos servicios (Roces-Díaz *et al.*, 2021). Tras un incendio, las administraciones aplican medidas como la retirada de madera quemada o el subsolado con fines de restauración. La combinación de un régimen de incendios alterado y una gestión post-fuego agresiva puede superar la capacidad de recuperación del ecosistema y su resiliencia. Sin embargo, se desconocen aún sus consecuencias funcionales y su impacto en los servicios ecosistémicos.

Así, el objetivo de esta Tesis fue evaluar cómo los incendios recurrentes y la gestión post-incendio afectan la capacidad de estos pinares para proporcionar servicios ecosistémicos a medio y largo plazo. Se analizó especialmente el servicio de producción micológica de especies comestibles de valor comercial, junto con servicios de regulación y soporte (descomposición de hojarasca y el reciclado de nutrientes) considerando el papel del legado biológico de la madera remanente. El estudio se realizó en la Sierra del Teleno (León, España), en tres zonas

afectadas por incendios severos en 1998, 2005 y 2012, con y sin tratamientos post-incendio (**Fig. 1**). Durante dos años se recolectaron semanalmente cuerpos fructíferos de hongos (setas) y se realizó un experimento de descomposición con bolsas de té rooibos.



Figura 1. Foto de la autora, Sara Turiel-Santos, en un pinar de *Pinus pinaster* recolectando setas y tomando datos durante el trabajo de campo para la Tesis.

Los resultados mostraron que los incendios extremos reducen la producción micológica, especialmente de especies comestibles. La recuperación fúngica comienza entre 10 y 20 años tras el fuego en especies como *Lactarius deliciosus* (“níscolo”), mientras que otras, como *Macrolepiota procera* (“parasol”), *Tricholoma portentosum* (“capuchina”) y *Boletus pinophilus* (“boletus de pino”), requieren más de dos décadas (Turiel-Santos *et al.*, 2024). La recurrencia de incendios agrava este impacto, aunque tratamientos como el subsolado y la plantación de pinos favorecen la recuperación, siendo clave la presencia de *Pinus pinaster*

(Turiel-Santos *et al.*, 2025a). Diez años después del incendio, la regeneración vegetal mejora la funcionalidad del suelo y servicios como la descomposición de hojarasca y el reciclaje de nutrientes. Sin embargo, los restos leñosos gruesos quemados (troncos, ramas o cepas) no contribuyeron a largo plazo en esa recuperación (Turiel-Santos *et al.*, 2025b).

La gestión de los restos leñosos gruesos quemados sigue siendo un reto. Resolverlo es esencial para evitar la acumulación de combustible y reducir el riesgo de incendios, y desde el grupo GEAT continuaremos investigando este y otros desafíos futuros.

Referencias

- Fernández-García, V., Calvo, L., Suárez-Seoane, S. y Marcos, E. 2023. Remote sensing advances in fire science: from fire predictors to post-fire monitoring. *Remote Sensing*. 15(20): 4930.
- Roces-Díaz, J. V., Vayreda, J., De Cáceres, M., García-Valdés, R., Banqué-Casanovas, M., Morán-Ordóñez, A. y Martínez-Vilalta, J. 2021. Temporal changes in Mediterranean forest ecosystem services are driven by stand development, rather than by climate-related disturbances. *Forest Ecology and Management*. 480:118623.
- Sayed, S. S., Abbott, B. W., Vannière, B., Leys, B., Colombaroli, D., Romera, G. G., y Daniau, A. L. 2024. Assessing changes in global fire regimes. *Fire Ecology*. 20(1):1-22.
- Taboada, A., García-Llamas, P., Fernández-Guisuraga, J.M. y Calvo, L. 2021. Wildfires impact on ecosystem service delivery in fire-prone maritime pine dominated forests. *Ecosystem Services*. 50: 101334.
- Turiel-Santos, S., Calvo, L., Martín Pinto, P. y Taboada, A. 2024. Large wildfires alter the potential capacity of fire-prone Mediterranean pine forests to provide wild edible mushrooms over the long term. *Trees, Forests and People*. 100658.
- Turiel-Santos, S., Calvo, L., Martín-Pinto, P. y Taboada, A. 2025a. Long-term influence of recurrent wildfires and post-fire management treatments on the fungal community in Mediterranean ecosystems. Manuscript sent to *Fire Ecology* (under review).
- Turiel-Santos, S., Calvo, L., Kotze, D. J. y Taboada, A. 2025b. Long-term impact of an extreme wildfire and salvage logging legacies on ecosystem services provision: Decomposition and nutrient cycling in fire-prone Mediterranean pine forests. *Forest Ecology and Management*. 576: 122381.



EDUCANDO EN LO NUESTRO

La experiencia del estudiantado de Ciencias Biológicas y Ambientales en la dinamización rural de la provincia de León. Programa RALBAR

Ana Vázquez Casares¹ y Raquel Domínguez Fernández¹

¹Coordinadoras del Programa RALBAR. Vicerrectorado de Inclusión Igualdad y Proyección Social. Universidad de León. amvazc@unileon.es, rdomf@unileon.es

Resumen

El programa RALBAR nace con la vocación de acercar la Universidad al territorio y contribuir a la dinamización de los entornos rurales de la provincia de León. A lo largo de sus cinco ediciones, esta iniciativa —impulsada por la Universidad de León en el marco de su estrategia frente al reto demográfico— ha permitido que estudiantes de distintas titulaciones diseñen e implementen proyectos de intervención social, cultural y ambiental en colaboración con las comunidades locales.

Este artículo se centra en el análisis de la participación del estudiantado de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, con el desarrollo de 8 proyectos a lo largo de 3 ediciones, que han contribuido al fomento de la sostenibilidad, la recuperación del patrimonio natural y la educación ambiental.

Se presenta una síntesis de los proyectos desarrollados, las competencias adquiridas, los niveles de satisfacción de los agentes implicados y el impacto ambiental y social generado, con el propósito de visibilizar el valor formativo, social y transformador de RALBAR como experiencia de aprendizaje en contexto real y de compromiso con el medio rural leonés.

Palabras clave

Aprendizaje experiencial, co-creación, RALBAR, revitalización rural.

Introducción

En la provincia de León la despoblación y el envejecimiento de la población rural suponen un desafío de gran magnitud. La provincia de León afronta, desde hace décadas, un acusado proceso de despoblación rural, reflejo del reto demográfico que afecta al conjunto de Castilla y León (Consejo Económico y Social de Castilla y León, 2023). Con una densidad media de apenas 29,8 habitantes por km², León se sitúa muy por debajo de la media nacional, y cerca del 40 % de su población reside en entornos rurales (Diputación de León, 2023) —una proporción que duplica la media española. Nuestra provincia cuenta con 211 muni-

cipios (Instituto Nacional de Estadística, 2024), la mayoría de ellos de pequeño tamaño y baja densidad poblacional y se estima que más de un centenar podrían considerarse en situación de riesgo demográfico por su pérdida continuada de habitantes, el envejecimiento de la población y la falta de relevo generacional. Desde el año 2000, León ha perdido cerca de 54.000 habitantes, y solo en 2024 los municipios de menos de 2.000 habitantes redujeron su censo en 771 personas. En la actualidad, se estima que existen en León 190 municipios con menos de 2000 habitantes, lo que significa que más del 90 % del total municipal leonés se incluye dentro de la categoría de pequeños municipios, característica que refleja la alta dispersión poblacional, la baja densidad del territorio y el vaciamiento demográfico que caracteriza al medio rural leonés.

Este panorama evidencia la urgencia de promover estrategias de dinamización social, económica y cultural que reactiven el medio rural leonés y garanticen su sostenibilidad, preservando la identidad, los saberes y el patrimonio que conforman la esencia de la provincia.

Frente a esta realidad, la Universidad se posiciona como motor activo, aportando recursos humanos y conocimiento para responder a los desafíos (Rodríguez y García, 2022). Profesores y estudiantes participan directamente en acciones concretas de revitalización —desde el mapeo de recursos locales hasta la recuperación de tradiciones culturales o la mejora de servicios comunitarios—, convirtiéndose en agentes de transformación que generan impacto tangible.

Con esa convicción nació el programa RALBAR, en el curso 2020-2021, como una iniciativa universitaria pionera que apuesta por la co-creación entre profesorado, estudiantes y agentes locales como estrategia de dinamización rural (Universidad de León, 2024). En RALBAR, la dinamización rural se contempla como herramienta y propósito estratégico a la vez: es una herramienta porque se realiza mediante un conjunto de acciones que generan impacto en el territorio y es un objetivo, en cuanto busca revitalizar los territorios rurales.

RALBAR es un vocablo leonés que significa “levantar el barbecho”, recuperar tierras abandonadas para su cultivo. El nombre refleja el espíritu del programa: revitalizar y poner en valor los espacios rurales mediante la acción y el compromiso. Pero, a su vez, Ralbar es la primera de tres tareas agrícolas. A Ralbar, le sigue “Binar” (fase de consolidación y expansión del impacto) y “Terciar” (fase enfocada en la sostenibilidad a largo plazo). Estas tres fases expresan el enfoque progresivo y adaptativo, donde cada etapa construye sobre los logros de la anterior, con el objetivo de generar un impacto duradero y transformador en las comunidades rurales de la provincia de León.

RALBAR se articula como un programa de prácticas extracurriculares de la Universidad de León, financiadas por la Fundación Banco Sabadell, destinadas a desarrollar proyectos de revitalización territorial en municipios rurales de la Provincia de León, de menos de 2000 habitantes.

Se trata de una convocatoria anual, que se publica en el mes de abril ofertando becas remuneradas a las que pueden optar todos los estudiantes de la Universidad de León, para desarrollar un proyecto de dinamización rural durante un periodo de dos meses: julio y agosto. En la última edición: 2024-2025 se han ofertado 13 becas. También se ha incrementado la cuantía económica, que en la última edición ascendió a una retribución al estudiante de 1000 euros/mes. El programa ofrece la oportunidad de desarrollar proyectos propios, con una doble tutorización: académica y en el territorio. La esencia de los proyectos RALBAR es la autoría del proceso. El estudiante identifica la necesidad, concibe y diseña el proyecto como propuesta de intervención a partir de los conocimientos de su titulación para afrontar el reto detectado y dinamizar el medio rural; no es el territorio el que solicita la acción, sino que el proyecto surge del compromiso y la iniciativa del estudiante universitario.

El enfoque de RALBAR se sustenta en tres pilares fundamentales. En primer lugar, la co-creación, como proceso en el que estudiantes, profesorado y agentes locales diseñan conjuntamente las acciones, reconociendo los saberes y recursos de cada parte (Villar Uribe, 2019; Agnello *et al.*, 2025; Escuela Europea de Excelencia, 2025). Este modelo parte de la idea de que los resultados más relevantes se logran cuando todos los actores participan activamente, compartiendo conocimientos, responsabilidades y decisiones, generando iniciativas pertinentes, sostenibles e innovadoras. Este enfoque favorece el aprendizaje práctico y el empoderamiento de los participantes, al tiempo que promueve la corresponsabilidad territorial y la interdisciplinariedad. En segundo lugar, el aprendizaje experiencial (Kolb, 2015), que convierte el territorio en aula y el contacto con la realidad rural en fuente de conocimiento, reflexión y compromiso (Gavillet, 2018). Y, en tercer lugar, la sostenibilidad, entendida como el equilibrio entre las dimensiones ambiental, social y económica.

En cada edición, los proyectos RALBAR presentan una gran diversidad temática, siempre vinculada al contexto local y al perfil formativo de quienes los impulsan. Cada propuesta nace de la confluencia entre la mirada del estudiante —sus motivaciones, competencias de la titulación y experiencias previas— y las necesidades y oportunidades del territorio en el que se desarrolla. Este encuentro no ocurre de manera aislada, sino que está guiado y acompañado por los tutores académicos y locales que favorecen la conexión entre el conocimiento universitario y la realidad rural.

Además, el programa cuenta con dos coordinadoras que velan por la coherencia y la calidad del conjunto, acompañando de forma activa a estudiantes y tutores. Su labor, además de la gestión del programa, incluye la visita a los territorios para conocer de primera mano el desarrollo de los proyectos, el seguimiento personalizado de cada beca y la participación en algunas de las actividades públicas y de difusión del programa.

Los productos RALBAR son el resultado tangible. La diversidad de productos refleja tanto la riqueza del territorio leonés como la capacidad de los estudiantes—acompañado por tutores y coordinadoras— para integrar los saberes disciplinares con las realidades y retos locales, generando conocimiento útil, sostenible y profundamente arraigado en el entorno.

El funcionamiento de RALBAR se estructura en torno a un proceso formativo y participativo desde la gestación de la idea hasta la culminación del proyecto (**Fig. 1**). Cada edición se despliega en varias fases interconectadas que combinan autonomía, acompañamiento y aprendizaje compartido.

- **Fase 0: Networking - Jornada de comunidad RALBAR.** En esta última edición, se ha incorporado por primera vez un espacio de Networking, celebrado unas semanas antes de la convocatoria. Es un espacio de encuentro entre miembros de la comunidad RALBAR de ediciones anteriores y personas interesadas en participar en el programa. Este espacio responde a dos objetivos: visibilizar oportunidades y retos abordados en ediciones anteriores y acercar a estudiantes, tutores y entidades para favorecer el intercambio de ideas y crear el germen de posibles proyectos.
- **Fase 1: Convocatoria y presentación de proyectos.** Tras la convocatoria pública, los estudiantes concursan presentando un proyecto de dinamización rural para dar respuesta a una necesidad detectada en el territorio elegido. Los proyectos han de estar avalados por dos tutores: uno académico y otro en el territorio. La selección por parte de la comisión pertinente de los proyectos se realiza atendiendo a criterios de viabilidad, sostenibilidad e impacto social o ambiental.
- **Fase 2: Formación inicial de los estudiantes becados.** Primeras reuniones con las coordinadoras y Jornada de Formación que engloba tres ejes: estrategias de implementación de proyectos y adaptación del proyecto inicial a las necesidades reales detectadas durante su desarrollo en el territorio; técnicas de recogida de datos en el territorio cualitativas y cuantitativas y manejo de Redes sociales y estrategias de divulgación de proyecto.
- **Fase 3: Implementación del proyecto en el territorio.** Durante los meses de verano (julio y agosto), los estudiantes se desplazan al territorio donde implementan sus proyectos. Esta experiencia supone un aprendizaje inmersivo, en contacto directo con la comunidad local y con el entorno natural y exige un alto grado de dinamismo, resiliencia y adaptación.
- **Fase 4: Cierre y socialización.** Al final de cada edición, los resultados se presentan públicamente en una jornada abierta pública en la que participan estudiantes, tutores, coordinadoras, representantes

institucionales y agentes locales. Esta jornada, constituye un espacio de diálogo y celebración en el que se ponen en común los logros, aprendizajes e impactos del programa.



Figura 1. Funcionamiento del programa RALBAR.

A lo largo del todo el proceso, el programa ofrece espacios colectivos de intercambio, acompañamiento y reflexión compartida. Estos encuentros fomentan el aprendizaje mutuo y la creación de una comunidad RALBAR que comparte valores y experiencias. Al trabajo continuo entre estudiantes y tutores, se une el acompañamiento de las coordinadoras y de las visitas de seguimiento, que permiten seguir de cerca los avances, resolver dificultades y reforzar los lazos entre los distintos actores.

Esta dinámica favorece un proceso integral de aprendizaje y compromiso. RALBAR no solo impulsa la dinamización rural desde una perspectiva sostenible, sino que también promueve una formación universitaria comprometida, interdisciplinar y abierta a la realidad social, natural y cultural de la provincia de León.

Participación del estudiantado, profesores y de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales

Desde la segunda edición del programa RALBAR, la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales y sus profesores han mostrado una implicación constante y significativa, y han contado con estudiantes becados en 3 de sus 5 ediciones. Los proyectos seleccionados han estado vinculados con la biodiversidad, la sostenibilidad ambiental, la etnobotánica, la bioeconomía o la educación ambiental.

Con su participación en el programa RALBAR, los estudiantes de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales han tenido oportunidad de aplicar sus conocimientos teóricos y técnicos en entornos rurales reales, observando la interacción entre biodiversidad, ecosistemas y comunidades locales y posicionarse como agentes activos de transformación. Sus proyectos, diseñados con un enfoque científico riguroso, promueven la sensibilización ambiental y la valorización de los recursos naturales y culturales del territorio, al tiempo que les permiten desarrollar competencias transversales que los preparan para asumir roles de liderazgo en conservación ambiental y la gestión territorial.

Pero el éxito de los proyectos también descansa en la implicación de los profesores de la Facultad. Su participación garantiza un seguimiento académico riguroso, pero también inspira y motiva a los estudiantes a desarrollar proyectos con impacto real en el medio rural. Según sus propias valoraciones, los profesores se implican porque reconocen el valor de conectar la teoría con la práctica, de ver cómo sus estudiantes aplican los conocimientos adquiridos en el aula para resolver problemas concretos, y de contribuir de manera tangible al desarrollo sostenible de las comunidades locales. Esta combinación de compromiso, experiencia y vocación hace que el programa funcione de manera eficaz, creando un vínculo potente entre estudiantes, comunidades y profesores.

Resultados y aprendizajes

La participación de los estudiantes de la Facultad de CC. Biológicas y Ambientales y sus proyectos

Los estudiantes de la Facultad de CC. Biológicas y Ambientales han participado en la 2ª, 3ª y 4ª edición del programa, presentando 8 proyectos, distribuidos en las ediciones de la siguiente manera: 2 proyectos en la edición 2ª y 3 proyectos en cada una de las ediciones 3ª y 4ª. Han implicado a 7 tutores académicos: 6 del Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental y 1 del Departamento de Química y Física Aplicadas.

Los proyectos se han distribuido por distintos municipios y reservas de la provincia de León, cumpliendo siempre con los requisitos recogidos en la convocatoria de menos de 2000 habitantes, siendo frecuente que se enclaven en territorios de gran diversidad ambiental como son los valles de Omaña y Luna o Reyero, orillas del río Cureño, o las montañas de Sabero y del Alto Sil.

Tabla 1. Listado de proyectos de los estudiantes relacionados con la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales

Edición	Estudiante	Titulación	Título del proyecto	Lugar de implantación	Entidad	Tutor Ule
Segunda	Guillermo Castiñeira Lera	DOBLE GRADO EN AMBIENTALES Y FORESTAL	Entre apiarios y flores”: calendario floral de interés apícola en la Reserva de la Biosfera de los Valles Omaña y Luna	Omaña y Luna	Reserva de la biosfera de los Valles de Omaña y Luna	Rosa María Valencia Barrera
Segunda	Daniel Escapa García	GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES	Las plantas olvidadas”: Un estudio etnobotánico del Valle de Sabero	Sabero	Museo de la Siderurgia y la Minería de Castilla y León.	Marta Eva García González
Tercera	María Mercedes Lozada Guzmán	DOCTORADO EN ECOLOGÍA FUNCIONAL Y APLICADA.	Etnobotánica en la Reserva de la Biosfera Valles de Omaña y Luna	Omaña y Luna	Reserva de la Biosfera de los Valles de Omaña y Luna	Eloy Bécares Mantecón
Tercera	Adrián Valiente Gómez	GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES	El valle olvidado: acciones para conocer y conservar el patrimonio natural y la memoria popular en la cabecera del río Curueño	Valdelugeros	Reserva de la Biosfera de Los Argüellos	Estrella Alfaro Saiz
Tercera	Paula García Díez	GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES	Archivo de recursos para la bioeconomía en la reserva de la Biosfera Valles de Omaña y Luna	Omaña y Luna	Reserva de la Biosfera de los Valles de Omaña y Luna	Ana Belén Fernández Salegui
Cuarta	Ana Isabel Robles Manzano	GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES	Fuentes de vida: un mapa de las fuentes rurales de nuestro pueblo	Barrillos de Curueño	Ayuntamiento de Santa Colomba de Curueño	Luis Carlos Robles García
Cuarta	Gala Gancedo González	GRADO EN BIOLOGÍA	Etnobotánica en el alto Sil y Laciana	Alto sil (Palacios y Páramo del Sil)	Asociación Club Xaitu de la Montaña Occidental Astur-Leonesa	Estrella Alfaro Saiz
Cuarta	María Mallo Robla	GRADO EN BIOLOGÍA	Ganadería y escarabajos peloteros en el Valle de Reyero: ¿Es posible un futuro más sostenible?	Reyero	Ayuntamiento de Reyero	Daniela Canestrani

La **Tabla 1** presenta un resumen de los proyectos realizados por los estudiantes becados dentro del programa RALBAR con relación con la Facultad, bien por su titulación o bien por la relación de su tutor académico con la Facultad. En ella se recoge información clave sobre cada estudiante, la edición del programa en la que ha participado, el proyecto desarrollado, así como los tutores académicos y la entidad que colabora en el proceso. Este cuadro permite visualizar de manera clara la diversidad de iniciativas impulsadas, así como la coordinación entre la Universidad y las entidades locales en la dinamización de los entornos rurales.

Estos proyectos, junto con el resto de los proyectos de estudiantes de otras titulaciones pueden consultarse en la página web del programa, donde se encuentran organizados por ediciones. <https://ralbar.unileon.es/>

Los 8 proyectos desarrollados por el estudiantado de la Facultad de CC. Biológicas y Ambientales, pueden englobarse de acuerdo a su temática central en 4 ejes:

- **Proyectos de conservación y divulgación ambiental:** cuyo objetivo principal es proteger, poner en valor y dar a conocer los recursos naturales de un territorio. Buscan que la comunidad conozca, valore y participe en la conservación de su entorno, fortaleciendo la conexión con el territorio y fomentando una gestión sostenible de los recursos naturales.
 - “El valle olvidado”, se centró en la conservación del patrimonio natural y la memoria popular en la cabecera del río Curueño.
 - “Fuentes de vida”, cartografió fuentes y manantiales del municipio de Santa Colomba de Curueño, combinando patrimonio, ciencia y participación local.
- **Proyectos de etnobotánica y saberes tradicionales:** estudian la relación entre las personas y las plantas, incluyendo sus usos medicinales, alimentarios, ceremoniales o productivos y/o conocimientos, prácticas y tradiciones locales vinculadas al entorno natural. Buscan valorar y revitalizar el patrimonio cultural y natural, integrando a la comunidad en la documentación de sus propios saberes, y generando recursos (como herbarios, inventarios o publicaciones) que puedan servir para educación, conservación y desarrollo local sostenible.
 - - “Las plantas olvidadas”, desarrolló un estudio etnobotánico del Valle de Sabero que recuperó el saber ancestral sobre los usos tradicionales de las plantas.
 - - “Etnobotánica en la Reserva de la Biosfera de Omaña y Luna” y “Etnobotánica en el Alto Sil y Laciana”, rescataron la memoria botánica popular y fomentaron la bioeconomía circular en torno a los recursos vegetales locales.

- **Proyectos de bioeconomía y sostenibilidad:** centrados en identificar, valorar y aprovechar de manera sostenible los recursos naturales de un territorio para generar oportunidades económicas respetuosas con el medio ambiente y con la comunidad local. Combinan investigación, innovación y desarrollo local, promoviendo alternativas económicas que respeten el medio rural, apoyen a la población local y contribuyan a la conservación de los recursos naturales.
 - “Archivo de recursos para la bioeconomía”, identificó oportunidades para el desarrollo de productos y servicios sostenibles en el ámbito rural.
- **Proyectos de divulgación científica aplicada:** centrados en llevar el conocimiento científico a la comunidad y ponerlo en práctica. Buscan conectar ciencia y sociedad, fomentando la participación de la población local, generando un aprendizaje activo y significativo para los habitantes del territorio.
 - “Entre apiarios y flores”, construyó un calendario floral de interés apícola en la Reserva de la Biosfera de Omaña y Luna, que unió ciencia, divulgación y emprendimiento rural.
 - “Ganadería y escarabajos peloteros en el valle de Rezero” estudió la biodiversidad de coleópteros y las alternativas ganaderas ecológicas, formando a ganaderos locales y apostando por la biodiversidad del suelo como estrategia de sostenibilidad.

La diversidad temática de los proyectos desarrollados refleja la amplia capacidad de actuación y el grado de responsabilidad de las ciencias biológicas y ambientales en la dinamización rural, el compromiso de los estudiantes con el entorno y de su capacidad de trasladar su formación académica a contextos reales.

Aunque cada proyecto cuenta con sus objetivos, podemos destacar objetivos comunes o compartidos en ellos:

- **Preservar y poner en valor el patrimonio natural y cultural** de las zonas rurales leonesas.
- **Contribuir a la sostenibilidad y dinamización rural**, impulsando el turismo responsable, la bioeconomía o la educación ambiental.
- **Transferir conocimiento académico** hacia las comunidades locales mediante actividades divulgativas y de formación.
- **Fomentar la participación y corresponsabilidad** de la población local en la gestión de sus recursos.
- **Desarrollar competencias científicas, comunicativas y sociales** en contextos reales de trabajo.

Tabla 2. Proyectos desarrollados por el estudiantado de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales.

Eje	Proyectos incluidos en este eje	Actividades principales
Conservación y divulgación ambiental	El valle olvidado Fuentes de vida	Estudios de flora, fauna y gea local Rutas interpretativas Talleres de educación ambiental
Etnobotánica y saberes tradicionales	Las plantas olvidadas Etnobotánica en Omaña y Luna Etnobotánica en el Alto Sil y Laciana	Entrevistas etnobotánicas Recolección de usos medicinales y alimentarios de plantas Catalogación de especies
Bioeconomía y sostenibilidad	Archivo de recursos para la bioeconomía en la RBVOyL	Identificación de recursos naturales con potencial productivo Análisis de sostenibilidad Propuestas de aprovechamiento responsable
Divulgación científica aplicada	Entre apiarios y flores Ganadería y escarabajos peloteros	Guías, calendarios y materiales didácticos; Difusión científica a la comunidad

Del mismo modo, las actividades que han desarrollado son muy variadas, pero se pueden agrupar en cuatro categorías:

- **Investigación aplicada:** recolección de datos de campo, entrevistas etnobotánicas, catalogación de especies y elaboración de materiales (herbarios, inventarios, archivos, etc.).
- **Educación y sensibilización ambiental:** talleres infantiles, charlas, filandones, podcasts, rutas interpretativas y exposiciones.
- **Difusión y comunicación:** creación de redes sociales y blogs, vídeos y documentales, cartelera y ferias locales.
- **Colaboración comunitaria:** trabajo con ayuntamientos, reservas de la biosfera, museos, asociaciones culturales y ganaderos locales.

En la **Tabla 2** se han recogido los proyectos desarrollados por el estudiantado de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales dentro del programa organizados en los 4 ejes temáticos y las principales actividades realizadas.

El impacto de los proyectos

A lo largo de las diferentes ediciones, los proyectos impulsados por el estudiantado de la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, han generado resultados tangibles que van más allá de los productos específicos —rutas interpretativas, herbarios, calendarios florales, archivos de recursos, señalización de fuentes, talleres o materiales divulgativos.

En RALBAR entendemos el **impacto** como el cambio significativo y sostenible que se produce en una comunidad o contexto, como consecuencia (directa o indirecta) de las acciones del proyecto. No se trata solo de resultados inmediatos (lo que se hace en cada proyecto), sino de **efectos más profundos y duraderos** (lo que cambia gracias a lo que se hizo). Desde esta conceptualización, los resultados pueden agruparse en dos dimensiones complementarias de acuerdo

con el impacto generado: el impacto **formativo y el impacto en el territorio**, ambiental y social o comunitario.

Impacto formativo y profesional

El programa RALBAR se ha consolidado como un espacio único de aprendizaje experiencial, donde los estudiantes aplican sus conocimientos en contextos reales del medio rural. Gracias a esta experiencia, desarrollan competencias técnicas, sociales y comunicativas, fortalecen sus habilidades de gestión de proyectos y aprenden a adaptar soluciones a situaciones complejas. Además, reflexionan sobre el impacto de sus acciones en el territorio y en las personas que lo habitan, convirtiéndose en protagonistas activos de la dinamización rural y en agentes de cambio comprometidos con la sostenibilidad y el desarrollo de sus comunidades.

Los **aprendizajes más significativos** identificados por los propios estudiantes de las titulaciones de ciencias biológicas y ambientales pueden agruparse de acuerdo con la adquisición de competencias intrapersonales, interpersonales y específicas de la titulación (Ortiz, 2011; Noriega-Morales, 2023). Las competencias intrapersonales se refieren a habilidades relacionadas con el autoconocimiento y la autorregulación; las interpersonales implican la capacidad para interactuar eficazmente con otros; y las específicas están vinculadas con el área de estudio.

Competencias intrapersonales

- Autonomía, iniciativa y autogestión del trabajo.
- Adaptación a imprevistos y resiliencia.
- Capacidad de planificación y evaluación crítica.
- Confianza y empoderamiento personal.

Competencias interpersonales

- Comunicación efectiva y divulgación científica.
- Escucha activa y trabajo con comunidades locales.
- Trabajo en equipo y coordinación con entidades colaboradoras.
- Liderazgo colaborativo y gestión de redes sociales.

Competencias específicas de la titulación

- Conocimientos aplicados en botánica, zoología, ecología y bioeconomía.
- Técnicas de investigación de campo, análisis de muestras y elaboración de herbarios.
- Diseño y ejecución de proyectos científicos y de divulgación.
- Integración de saberes tradicionales con ciencia ambiental contemporánea.

La **Tabla 3** muestra las competencias adquiridas en cada proyecto atendiendo a la clasificación de competencias intrapersonales, competencias interpersonales y competencias específicas de la titulación.

Tabla 3. Competencias adquiridas en cada proyecto.

- CIP: Competencias Intrapersonales (autonomía, resiliencia, adaptación, perseverancia, etc.)
- CI: Competencias Interpersonales (relacionadas con comunicación, trabajo en equipo, colaboración, etc.)
- CE: Competencias Específicas de la titulación (conocimientos técnicos o científicos, habilidades profesionales específicas)

Eje	Proyecto	Competencias adquiridas
Conservación y divulgación ambiental	El valle olvidado: acciones para conocer y conservar el patrimonio natural y la memoria popular en la cabecera del río Curueño	<ul style="list-style-type: none"> ● Adaptación a imprevistos y resiliencia ● Autonomía, iniciativa y autogestión del trabajo ● Comunicación efectiva y divulgación científica ● Escucha activa y trabajo con comunidades locales ● Trabajo en equipo y coordinación con entidades colaboradoras ● Conocimientos aplicados en ecología y botánica ● Integración de saberes tradicionales con ciencia ambiental contemporánea
	Fuentes de vida: un mapa de las fuentes rurales de nuestro pueblo	<ul style="list-style-type: none"> ● Adaptación a imprevistos y resiliencia ● Escucha activa y trabajo con comunidades locales ● Comunicación efectiva y divulgación científica ● Conocimientos aplicados en ecología y botánica ● Diseño y ejecución de proyectos científicos y de divulgación
Etnobotánica y saberes tradicionales	Las plantas olvidadas": Un estudio etnobotánico del Valle de Sabero	<ul style="list-style-type: none"> ● Comunicación efectiva y divulgación científica ● Liderazgo colaborativo y gestión de redes sociales ● Diseño y ejecución de proyectos científicos y de divulgación ● Integración de saberes tradicionales con ciencia ambiental contemporánea
	Etnobotánica en la Reserva de la Biosfera Valles de Omaña y Luna	<ul style="list-style-type: none"> ● Comunicación efectiva y divulgación ● Conocimientos aplicados en botánica y ecología ● Técnicas de investigación de campo, análisis de muestras y elaboración de herbarios científicos ● Integración de saberes tradicionales con ciencia ambiental contemporánea
	Etnobotánica en el alto Sil y Laciana	<ul style="list-style-type: none"> ● Adaptación a imprevistos y resiliencia ● Comunicación efectiva y divulgación científica ● Escucha activa y trabajo con comunidades locales ● Conocimientos aplicados en botánica y ecología ● Diseño y ejecución de proyectos científicos y de divulgación ● Técnicas de investigación de campo y elaboración de herbarios
Bioeconomía y sostenibilidad	Archivo de recursos para la bioeconomía en la reserva de la Biosfera Valles de Omaña y Luna	<ul style="list-style-type: none"> ● Autonomía, iniciativa y autogestión del trabajo ● Trabajo en equipo y coordinación con entidades colaboradoras ● Liderazgo colaborativo y gestión de redes sociales ● Comunicación efectiva y divulgación científica ● Escucha activa y trabajo con comunidades locales ● Diseño y ejecución de proyectos científicos y de divulgación ● Técnicas de investigación de campo y análisis de muestras ● Conocimientos aplicados en bioeconomía y ecología

Divulgación científica aplicada	Entre apiarios y flores”: calendario floral de interés apícola en la Reserva de la Biosfera de los Valles Omaña y Luna	<ul style="list-style-type: none"> ● Adaptación a imprevistos y resiliencia ● Autonomía, iniciativa y autogestión del trabajo ● Comunicación efectiva y divulgación científica ● Diseño y ejecución de proyectos científicos y de divulgación ● Integración de saberes tradicionales con ciencia ambiental contemporánea
	Ganadería y escarabajos peloteros en el Valle de Reyero: ¿Es posible un futuro más sostenible?	<ul style="list-style-type: none"> ● Adaptación a imprevistos y resiliencia ● Trabajo en equipo y coordinación con entidades colaboradoras ● Comunicación efectiva y divulgación científica ● Diseño y ejecución de proyectos científicos y de divulgación ● Técnicas de investigación de campo y análisis de muestras ● Conocimientos aplicados en zoología y ecología

De manera general, el nivel de satisfacción del estudiantado implicado con el programa ha sido valorado como muy alto. En una escala de 1 a 5, el 90 % lo evalúan con una satisfacción de 5=completamente satisfecho y un 10 % con un 4= altamente satisfecho/a. A nivel cualitativo, los estudiantes valoran RALBAR como una “oportunidad única para poner en práctica ideas propias, conocer el territorio y crecer personal y profesionalmente”. Muchos de ellos expresan que su participación les ha permitido descubrir vocaciones y proyectos de vida ligados al medio rural, así como mejorar su empleabilidad en sectores como la gestión ambiental, la bioeconomía o la educación científica.

En los informes de evaluación del programa y en los testimonios recogidos, los estudiantes destacan que les ha permitido “aprender haciendo”, “comprender el valor del trabajo colaborativo” y “mirar el territorio con una perspectiva nueva”. Los tutores universitarios y las entidades locales resaltan la madurez y compromiso del alumnado, así como la capacidad del programa para generar innovación social desde la educación.

Asimismo, los tutores destacan que, a través del desarrollo de los proyectos, los estudiantes han adquirido aprendizajes significativos que trascienden la teoría. En este proceso, los estudiantes fortalecen sus competencias técnicas, sociales y de gestión de proyectos, aprenden a trabajar de manera colaborativa y a integrar diversas perspectivas para resolver problemas complejos. Al mismo tiempo, los tutores académicos y las entidades implicadas amplían su comprensión sobre la dinámica del trabajo comunitario, la coordinación interdisciplinar y la manera de guiar y acompañar a los estudiantes, consolidando un aprendizaje compartido que enriquece a todos los participantes y mejora la pertinencia y efectividad de los proyectos en el territorio. El aula se amplía al espacio rural, el estudiante se convierte en dinamizador y el conocimiento académico se traduce en acción con sentido.

Por otro lado, es importante también añadir el valor y el impacto del programa en la empleabilidad futura. Para muchos estudiantes, RALBAR ha supuesto su primera experiencia laboral vinculada a su ámbito académico, lo que refuerza su empleabilidad y amplía su horizonte profesional hacia sectores emergentes

como la **bioeconomía**, la **educación ambiental** o la **gestión del patrimonio natural**.

Impacto en el territorio

Los proyectos han generado un impacto significativo en los territorios rurales donde se han implementado, tanto desde una perspectiva ambiental como social. Su enfoque integral permite actuar simultáneamente sobre la sostenibilidad ecológica, la cohesión comunitaria y el fortalecimiento institucional, contribuyendo a un desarrollo rural equilibrado, responsable y duradero.

El impacto **ambiental** de los proyectos RALBAR se manifiesta en la conservación de la biodiversidad, la sostenibilidad en el uso de los recursos naturales y la sensibilización ecológica de la población, acciones que contribuyen directamente a la preservación y puesta en valor del patrimonio natural (Díez-Gutiérrez y Rodríguez-Rejas, 2022; Martínez *et al.*, 2022; Bernal, 2024). Además, la colaboración con reservas de la biosfera, ayuntamientos y asociaciones locales ha permitido reforzar estrategias de gestión sostenible, diversificación económica y educación ambiental en el territorio.

Las comunidades rurales valoran la mirada universitaria y la participación de jóvenes que actúan como agentes de cambio en su territorio. El impacto **social** se genera a través de la implicación activa de la *comunidad* local. Esta participación favorece la recuperación de la memoria ecológica y cultural, fortalece los vínculos intergeneracionales y promueve una conciencia ambiental compartida (López, 2002; Saco *et al.*, 2015; Sánchez, 2019). El impacto social también se refleja en el ámbito *institucional*. El programa refuerza la misión social y territorial de la Universidad de León, consolidando los vínculos entre la Universidad y el territorio, la transferencia de conocimiento y la proyección social.

La forma más tangible de medir el impacto alcanzado por los proyectos RALBAR se refleja en su contribución directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024). En la **Tabla 4** se muestra la evaluación del impacto de los 8 proyectos RALBAR en los ODS atendiendo a los impactos ambientales y social generados en los territorios rurales donde se implementaron las acciones.

El análisis conjunto de los 8 proyectos evidencia una clara orientación hacia los ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y ODS 13 (Acción por el clima), que aparecen de forma recurrente en casi todas las iniciativas. Esto refleja una fuerte preocupación por la sostenibilidad ambiental, la preservación de la biodiversidad y la transmisión de prácticas rurales respetuosas con el entorno.

En el plano **social**, destacan los ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico) y ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), que subrayan la apuesta del programa por la revitalización del medio rural mediante la creación de oportunidades locales, el impulso de la innovación social y la cohesión comunitaria.

Además, los ODS 3 (Salud y bienestar) y ODS 4 (Educación de calidad) se ven reforzados a través de la recuperación del conocimiento tradicional, la divulgación científica y la educación ambiental.

La **Tabla 4** muestra el impacto en el territorio de cada proyecto, desglosado en contribución a los ODS, impacto ambiental e impacto social (comunitario e institucional).

Tabla 4. Impacto social y ambiental de los 8 proyectos. **Leyenda:** ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible. **(C)**=impacto Comunitario; **(I)**= impacto Institucional.

Eje de proyecto	Proyecto	ODS	Impacto ambiental	Impacto social
Conservación y divulgación ambiental	El Valle Olvidado	3, 4, 12, 15	<ul style="list-style-type: none"> Puesta en valor del patrimonio natural y paisajístico Fomento del uso sostenible del entorno 	<ul style="list-style-type: none"> (C) Incremento del conocimiento local sobre el patrimonio natural y cultural. (C) Concienciación sobre la fragilidad del entorno y la necesidad de su protección. (C) Preservación de conocimientos tradicionales y elaboración de materiales educativos. (I) Promoción de la cooperación universidad-territorio en acciones de divulgación científica. (I) Inclusión del proyecto en redes académicas de educación ambiental
	Fuentes de vida	6,11 y 15	<ul style="list-style-type: none"> Protección de fuentes naturales, mejora de la gestión hídrica y sensibilización sobre el recurso agua 	<ul style="list-style-type: none"> (C) Revitalización del patrimonio natural y cultural mediante la recuperación de fuentes de agua. (C) Mejora del acceso y conocimiento de los recursos hídricos locales. (C) Fomento de la conciencia ambiental y del turismo sostenible. (I) Cooperación con ayuntamientos y reservas de la biosfera. (I) Difusión institucional de buenas prácticas en sostenibilidad y turismo responsable
Etnobotánica y saberes tradicionales	Las plantas olvidadas	3, 4, 15	<ul style="list-style-type: none"> Promoción de la biodiversidad vegetal y del uso responsable de los recursos naturales 	<ul style="list-style-type: none"> (C) Redescubrimiento del valor botánico del territorio a través de rutas guiadas y talleres. (C) Acercamiento intergeneracional mediante actividades divulgativas con adultos y niños. (C) Fortalecimiento del vínculo entre conocimiento científico y saber popular. (I) Consolidación de la universidad como agente divulgador del patrimonio natural y cultural. (I) Difusión del proyecto en redes institucionales y académicas

	Etnobotánica Omaña y Luna	3, 12, 15	<ul style="list-style-type: none"> Conservación de especies autóctonas y prácticas sostenibles de recolección 	<ul style="list-style-type: none"> (C) Recuperación de saberes tradicionales (C) Transferencia de conocimiento en nuevos formatos (podcasts, materiales digitales). (C) Formación en emprendimiento y sostenibilidad local. (I) Colaboración con entidades locales y museos etnográficos. (I) Proyección institucional de la universidad en iniciativas de patrimonio inmaterial.
	Etnobotánica Alto Sil	8, 11, 12, 13, 15	<ul style="list-style-type: none"> Promoción del turismo sostenible y conservación del patrimonio natural 	<ul style="list-style-type: none"> (C) Preservación del conocimiento ancestral sobre plantas y usos tradicionales. (C) Fortalecimiento del tejido social mediante la participación comunitaria. (C) Sensibilización sobre sostenibilidad y prácticas respetuosas con el medioambiente. (C) Desarrollo de habilidades locales para la autosuficiencia y resiliencia territorial. (I) Colaboración estable con asociaciones culturales y ambientales. (I) Reforzamiento del rol de la universidad como garante de la memoria ecológica y cultural.
Bioeconomía y sostenibilidad	Archivo de recursos	9, 12, 13, 14, 15	<ul style="list-style-type: none"> Digitalización sostenible y difusión de recursos naturales y culturales 	<ul style="list-style-type: none"> (C) Participación de la comunidad en jornadas interactivas y exposiciones. (C) Difusión de prácticas sostenibles vinculadas a la bioeconomía local. (C) Promoción de la identidad territorial mediante la valorización de productos y servicios locales. (I) Consolidación de alianzas con emprendedores rurales y entidades locales. (I) Proyección del trabajo universitario en el ámbito de la bioeconomía provincial.
Divulgación científica aplicada	Entre apiarios y flores	2, 8, 12 y 13	<ul style="list-style-type: none"> Revalorización de prácticas agrícolas tradicionales y sostenibles Recuperación de saberes rurales que reducen la huella ecológica 	<ul style="list-style-type: none"> (C) Revalorización del sector apícola local y de sus productos derivados como motor de desarrollo rural. (C) Sensibilización de la población sobre la calidad de la miel local y su papel en la fijación de población. (C) Generación de conocimiento compartido mediante entrevistas y materiales divulgativos. (I) Fortalecimiento de la relación entre la Universidad de León y el tejido productivo local. (I) Transferencia de conocimiento aplicado al ámbito agroambiental.

Divulgación científica aplicada	Ganadería y escarabajos peloteros	13, 15	<ul style="list-style-type: none"> Contribución a la mitigación del cambio climático mediante buenas prácticas ganaderas 	<ul style="list-style-type: none"> (C) Contribución a la conservación de la biodiversidad mediante el estudio de coleópteros coprófagos. (C) Promoción de prácticas ganaderas sostenibles y reducción del impacto de antiparasitarios. (C) Incremento de la conciencia ambiental y del turismo científico y sostenible. (C) Participación comunitaria e intergeneracional en la recolección y análisis de datos. (I) Participación en redes científicas y ambientales vinculadas a la conservación de ecosistemas. (I) Difusión de resultados y metodologías en espacios académicos e institucionales
---------------------------------	-----------------------------------	--------	---	---

Conclusiones

En un momento en que los desafíos medioambientales, demográficos y sociales demandan nuevas formas de colaboración, RALBAR demuestra que la formación universitaria puede convertirse en una palanca de transformación para el medio rural. Por su parte, los proyectos desarrollados mostraron cómo la biología y las ciencias ambientales pueden contribuir directamente a la conservación, la sostenibilidad y la resiliencia de los ecosistemas rurales.

Estos proyectos, centrados en la recuperación de saberes tradicionales, la etnobotánica, la gestión del agua, la biodiversidad y la sostenibilidad agro-ganadera, tradujeron los principios científicos en acciones concretas de mejora ambiental y social. A través de ellos, los estudiantes aplicaron metodologías propias de la investigación biológica al estudio del territorio, desarrollando una comprensión situada del conocimiento y fortaleciendo competencias como la autonomía, la empatía, la creatividad y la responsabilidad ecológica.

En el desarrollo de estos proyectos la experiencia directa se convirtió en fuente de conocimiento y el compromiso con la comunidad en motor de desarrollo personal y profesional. El aprendizaje se produce en el territorio y con el territorio, y se rompen las jerarquías tradicionales del aprendizaje.

El diálogo es horizontal. Los saberes académicos y los saberes tradicionales dialogaron en igualdad, generando un ecosistema de aprendizaje colaborativo alineado con la Agenda 2030 y con los ODS 4 (Educación de calidad), 13 (Acción por el clima) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres).

Además, los estudiantes implicados han podido redefinir la identidad y la vocación profesional, reforzar su compromiso y responsabilidad social, comprobando que pueden mejorar la vida de las personas y de los entornos naturales, dejando una huella profunda en su manera de concebir su futuro profesional y su papel como agentes de cambio.

Finalmente, el análisis de las cinco ediciones del programa pone de manifiesto la viabilidad y la replicabilidad del modelo. La estructura flexible de RALBAR, basada en la colaboración interinstitucional y en la autonomía de los estudiantes, permite adaptarlo a distintos contextos y disciplinas. Este carácter transferible convierte al programa en una referencia para otras universidades que busquen integrar la sostenibilidad, la innovación social y el aprendizaje en territorio dentro de su oferta formativa.

El Programa RALBAR: "Innovación educativa para la formación de agentes de cambio en el entorno rural" recibió el primer premio en la edición 2025 de los Premios a la Innovación en la Enseñanza 2025 del Consejo Social de la Universidad de León.

Bibliografía

- Agnello, D.M., Leask, C.F., Gagnon, M. *et al.* 2025. Co-creation methods for public health research: a systematic review. *BMC Medical Research Methodology*, 25(1):1-10. doi: 10.1186/s12874-025-02514-4.
- Bernal, Y.M. 2024. Evaluación de impacto ambiental en actividades agroproductivas para garantizar la sostenibilidad en zonas rurales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 26(2): 1-15.
- Consejo Económico y Social de Castilla y León. 2023. Informe sobre la despoblación y el reto demográfico en Castilla y León. Valladolid: Consejo Económico y Social de Castilla y León. Disponible en: <https://www.cescyl.es>
- Díez-Gutiérrez, E.J. y Rodríguez-Rejas, M.J. 2022. Retos y propuestas para repoblar la España vaciada: "Por una España repoblada". *Desarrollo Rural*, 18(1): 1-20.
- Diputación de León. 2023. Plan contra la despoblación y estrategias de desarrollo territorial en la provincia de León. León: Diputación Provincial de León.
- Escuela Europea de Excelencia. 2015. El principio de la co-creación [Internet]. [citado 2025 Oct 24]. Disponible en: <https://www.escuelaeuropeaexcelencia.com/2015/02/el-principio-de-laco-creacion>
- Gavillet, R. 2018. Experiential Learning and Its Impact on College Students. *Educ. J.*, 48(3): 45-59.
- Instituto Nacional de Estadística. 2024. Padrón municipal. Datos por municipios. Madrid: INE. Disponible en: <https://www.ine.es>
- Kolb, D.A. 2018. *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. 2nd ed. Upper Saddle River (NJ): Pearson Education; 2015.
- López, C.JÁ. Ambiente y desarrollo rural. 2024. Proyecto LIFE 99 ENV/E/. [Internet]. 2002 [citado 2025 Oct 24]. Disponible en: <https://www.re-dalyc.org/pdf/391/39111203.pdf>
- Martínez, G., Luján, M.C, Audisio, M^aC. y Romero, C. 2022. Proyectos de Etnobotánica y Ecoturismo con enfoque de Educación Ambiental: estudios de casos en la

- Provincia de Córdoba, Argentina. *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 18(2): 92-106.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). 2024. Indicadores de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. [Internet]. Madrid: MITECO; 2024 [citado 2025 Oct 24]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/servicios/estadisticas/indicadores-objetivos-de-desarrollo-sostenible--ods-.html>
- Noriega-Morales, P. 2023. Habilidades intrapersonales e interpersonales como competencias para el desempeño profesional en estudiantes universitarios. *Revista Innovaciones Educativas*, 25(1): 1-10. Disponible en: <https://revistainnovaciones.uanl.mx/index.php/revin/article/download/409/467/1627>
- Ortiz, V.H.C. 2011. Definición y clasificación teórica de las competencias. *Revista de Educación*. 355: 31-50.
- Rodríguez, M. y García, J. 2022. Universidad y territorio: experiencias de aprendizaje-servicio en el medio rural. *Revista Innovación Educativa*, 15(2): 45-59.
- Saco, A., Fraiz, J.Á., Lazovski, O. 2015. Despoblación, turismo y desarrollo rural en el interior de Galicia: un estudio de casos. En: Enfoques empresariales de la gestión científica, transferencia de conocimiento a la empresa Fraiz Brea, J.A, Araújo Vila, N. (coords.). Ourense: Universidade de Vigo; pp. 222-227.
- Sánchez, A.M. y Jesús, F. 2019. Impacto del turismo rural sobre el empleo en España: una aproximación a escala provincial. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15(82): 1-14. Universidad de León. 2024. Programa RALBAR: becas universitarias para la dinamización del medio rural leonés. León: Vicerrectorado de Inclusión, Igualdad y Sostenibilidad. Disponible en: <https://ralbar.unileon.es/>
- Villar Uribe, A. 2019. Co-creación y ruralidad: dupla para la construcción de territorios sostenibles. *Revista de Arquitectura y Urbanismo*, 12(2): 45-58.

DE TODO UN POCO

La Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales (FCCBA), durante este año 2025, ha continuado organizando y participando en numerosos eventos de carácter formativo, científico y cultural.

En esta ocasión, es la titulación de Biotecnología la que aparece en el 4º puesto en el ranking que elabora el Diario El Mundo sobre las mejores universidades de España. El comité de evaluación ha calificado de excelentes aspectos como las instalaciones, la preparación del profesorado y la organización.

La Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales ha aparecido, de manera ininterrumpida en los últimos nueve años con alguna de las titulaciones que se imparten, así Biotecnología ha sido posicionada entre las cinco mejores de España, además de este año 2025, en 2017, 2018, 2019 y 2021; Biología lo ha hecho en 2019 y 2023 y el grado en Ciencias Ambientales en 2018, 2022 y 2024.

Este año tenemos que lamentar la triste pérdida de una de nuestras estudiantes Marina Pedraja Crespo, estudiante de 4º curso del grado de Ciencias Ambientales, que falleció el 28 de abril por causas naturales. En su recuerdo la comunidad universitaria de León guardó en la mañana del 29 de abril un emotivo minuto de silencio a las puertas de la Facultad.

Jornadas, charlas y conferencias

El 11 de febrero, con motivo de la celebración del **Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia**, la asociación Bioma organizó un coloquio con la participación de investigadoras de nuestra Facultad (**Fig. 1**) y la Dra. Salma Latique impartió una charla sobre el trabajo de la mujer en la Ciencia en Marruecos.

Desde la Unidad de Cultura Científica se coordinó un variado programa de actividades, charlas y talleres con el objetivo de visibilizar el trabajo de las investigadoras y promover iniciativas que favorezcan la igualdad de género en el campo científico y fomentar las vocaciones científicas y tecnológicas en niñas y adolescentes. Entre las diversas actividades realizadas destacaron la charla taller: “Incendios forestales extremos y sus implicaciones sociales: ¿Qué podemos hacer?” que diseñó la profesora Leonor Calvo Galván para alumnos de primaria y secundaria de la provincia de Zamora, la charla impartida en la Facultad por Pilar Carrancio titulada: “El maíz es la caña”, y el taller propuesto por María Borrego Ramos para alumnos de 3º de la ESO realizado en La Robla: “Detectives del agua: ¿Cómo afectan las bolsas sostenibles a la vida acuática?”. Este taller, organizado por Investigadores Proyecto CIDIA-micro + Laboratorio de Diatomología de la ULE, también fue realizado por los alumnos de secundaria del I.E.S. Claudio Sánchez Albornoz de León.



Figura 1. Cartel Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia.

El 13 y 14 de febrero la Asociación de Investigadores en Formación de la Universidad de León (AIF-ULE), organizó las **I Jornadas de Iniciación a la Investigación**.

La actividad es una iniciativa de este colectivo científico para dar visibilidad a su trabajo y fomentar el desarrollo de habilidades esenciales en la comunidad académica. En estas Jornadas se registraron un total de 80 investigadores en formación y 26 estudiantes de Biología, Ciencias Ambientales y Biotecnología de la ULE que pudieron presentar los resultados de sus investigaciones de Trabajos de Fin de Grado (TFG), Trabajos de Fin de Máster (TFM) o de sus primeros años de doctorado, a través de un programa variado que incluía comunicaciones orales, pósteres y “fast-talks”, con el objetivo de que los participantes adquirieran y perfeccionaran sus destrezas de presentación y defensa ante la comunidad científica.

Estas Jornadas, que contaron con una mesa redonda sobre “La carrera investigadora”, también son una oportunidad para presentar a los diferentes grupos de investigación que actualmente desarrollan proyectos en la FCCBA, y sus líneas de trabajo.

Durante los meses de febrero a mayo tuvo lugar el **II Ciclo de conferencias de Investigación y Divulgación Científica** en el Aula Magna de la FCCBA impartándose las siguientes conferencias: “Patología infecciosa porcina:

de la resistencia a los antibióticos a la fagoterapia” (Dr. Óscar Mencía Ares); “El ocaso del imperio: adaptaciones en conflicto de una hormiga invasora” (Dr. Iago Sanmartín Villar); “Neandertales y otros compañeros de viaje. Recorrido de un paleoantropólogo” (Dr. Antonio García Tabernero); “Evaluación de la interacción de xenobióticos con el transportador ABCG2: efecto en la seguridad de la leche” (Dra. Esther Blanco Paniagua); “La geografía de la vida: historias de enanos y gigantes” (Dr. Jorge García Girón); “Identificación de loci implicados en la adaptación a altas temperaturas en cowpea (*Vigna unguiculata*)” (Dr. Luis Getino Alonso); “Patrones evolutivos de escarabajos acuáticos en hábitats extremos” (Dr. Adrián Villastrigo Carbajo) y “Colmillos y garras: ecología, comportamiento y conservación de grandes y pequeños carnívoros” (Dr. Héctor Ruiz Villar).

El pasado 28 de febrero, nuestra *Alumni* de Honor Sara García visitó nuestra Facultad y realizó un encuentro con los medios de comunicación en el laboratorio que lleva su nombre. En dicho acto, la Decana de la Facultad le hizo entrega de una réplica de la placa del laboratorio (**Fig. 2**). Posteriormente tuvo lugar un encuentro-charla en el salón de actos de la Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial. La Decana de la Facultad, Laura López, y la profesora e investigadora Margarita Marqués acompañaron a Sara durante la charla en la que abordó cuestiones como el futuro de las carreras STEM y la brecha de género que aún persiste, los retos actuales en el ámbito de la Biotecnología o cómo se pueden fusionar dos profesiones a priori tan dispares como la de investigadora y astronauta.



Figura 2. Sara García recibiendo una réplica de la placa del laboratorio.

La Asociación de Biotecnólogos de León (ABLe), organizó una nueva edición del ciclo de conferencias de divulgación científica **ConCiencia**. Este proyecto, que tiene como objetivo la divulgación científica facilitando el acceso a todos los públicos, se realizó los días 28 de febrero y 7 y 21 de marzo en la Fundación Sierra Pambley. Las ponencias fueron las siguientes: “¿Plásticamente infértiles” (Dra. Marta Lombó); “La pared celular de plantas, más allá de una simple barrera” (Dr. Asier Largo) y “¿Por qué no regeneramos como las salamandras? Descubriendo nuestro potencial” (Dra. María Ángeles Ros).

También organizadas por ABLe, se realizaron, un año más, las Jornadas **Con Ciencia, Té**. Las charlas fueron impartidas, en el café Varsovia, los días 22 y 29 de octubre y el 5 de noviembre por estudiantes de los Grados de Biotecnología, Biología y Ciencias Ambientales de nuestra Facultad. Se impartieron las siguientes charlas: “Creatina más allá del deporte” (Imanol Fernández Carrera); “Hormonas, longevidad y bienestar femenino: repensando la menopausia desde la ciencia” (Carlos Galán da Silva); “Quitosano: el terror de los metales pesados” (Íñigo Andrés Pastor); “Microbiota intestinal y obesidad” (Nerea Ibáñez Adán); “Spinosaurus: El gigante Pacífico” (Diego López Juan); CRISPR, la tecnología que cambiará a nuestros hijos” (Sebastián Arrieta Rodríguez); “25 años haciendo bebés” (Elsi Suárez Álvarez); “Cógelo con pinzas. Ecología y arte para ubicar el origen del cangrejo de río” (Carlos Antonio Cuenya Duarte) y “Biorrefinerías lignocelulósicas y producción de bioetanol: ¿presente o futuro?” (Lucía Llamazares Tascón).

Desde hace siete años, jóvenes investigadores de la Universidad de León y de la Universidad Tras os Montes e Alto Douro (Portugal) se unen para celebrar las Jornadas Ibéricas de Genética y Biotecnología, un congreso que nació en la ciudad portuguesa de Vila Real y que, desde hace siete ediciones, organiza también la FCCBA convirtiéndolo así en un evento internacional para los estudiantes de grado, máster y doctorado de ambas universidades. Los principales objetivos de estas Jornadas son el intercambio de conocimientos científicos entre estudiantes, docentes e investigadores, así como la actualización de las diferentes áreas de la Genética y la Biotecnología.

Esta edición tuvo lugar los días 12 y 13 de marzo en Vila Real (Portugal) y 14 y 15 de marzo en León. Estas **VII Jornadas Ibéricas de Genética y Biotecnología**, están organizadas, en la parte española, por estudiantes y profesores de la Universidad de León junto con la ABLe y se centran en visibilizar el tejido empresarial de León y sus alrededores, así como en dar a conocer a los estudiantes la investigación de la Universidad de León (**Fig. 3**).

En este año la Facultad ha organizado un **Foro de Orientación Profesional**, celebrado el 27 de marzo bajo el lema “Conectando Talento e Innovación en Biociencias”. Este evento reunió a estudiantes de los últimos cursos de los Grados en Biología, Biotecnología y Ciencias Ambientales, así como a estudiantes de máster y recién graduados que buscan incorporarse al mercado laboral.

Durante la sesión, distintos profesionales de empresas de referencia en el sector como: Dsm-firmenich, Vexiza, LeónResearch, Curia y Chemo, compartieron su experiencia y visión sobre el presente y futuro de la industria. Durante las charlas explicaron aspectos que van desde la biotecnología aplicada a la salud hasta la sostenibilidad ambiental, el análisis genético y la investigación en nuevas terapias. Además, los representantes de estas compañías respondieron a las inquietudes de los estudiantes sobre las competencias y perfiles más demandados en el mercado actual.



Figura 3. Cartel VII Jornadas Ibéricas de Genética y Biotecnología.

La mañana concluyó con un coloquio interempresas, y la presentación de diversas ofertas de prácticas en empresas de la mano de la Fundación General de la Universidad de León y de la Empresa (FGULEM) (**Fig. 4**).

Los días 7, 8 y 9 de abril se celebraron las **VI Jornadas de Puertas Abiertas**, una oportunidad para que los futuros estudiantes universitarios conozcan la oferta académica de la ULE y puedan visitar las facultades y escuelas, así como los distintos servicios e instalaciones.

El grupo de investigación GEAT (Ecología Aplicada y Teledetección) de la Universidad de León realizó unas charlas y talleres los días 26 y 28 de abril con el título: “Paisajes en llamas, de la ciencia a la acción”. Esta es una iniciativa de aprendizaje-servicio con objeto de explicar, de forma accesible, las causas y consecuencias de los incendios y cómo prevenirlos. Este proyecto está impulsado por los investigadores de la ULE José Manuel Fernández Guisuraga y Leonor Calvo

Galván y tiene también como objetivo formar a los estudiantes en comunicación científica y diálogo con la sociedad.



Figura 4. Alumnos de la Facultad participando en el Foro de Orientación Profesional.

Las distintas actividades se realizaron en colaboración con los Ayuntamientos de Castrocontrigo y de Truchas, zonas afectadas por este tipo de incendios. En ellas participaron estudiantes de cuarto curso del Grado en Ciencias Ambientales, de la asignatura “Ecología del Fuego”, quienes fueron los encargados de diseñar y llevar a cabo las actividades divulgativas.

Del 19 al 23 de mayo se realizaron las **XII Jornadas Prácticas de Botánica**, con el objetivo de visibilizar la botánica en el entorno universitario y dar a conocer los avances actuales en el ámbito de la biología de la conservación de especies vegetales. En estas jornadas participaron diversos profesores del **Área de Botánica**, así como estudiantes del Grado en Biología, dirigidos por la profesora Victoria Ferrero Vaquero.

Durante los meses de septiembre y octubre, el Vicerrectorado de Internacionalización y Compromiso Global de la Universidad de León puso en marcha el **Ciclo de Conferencias: “La Inteligencia Artificial que viene: Una mirada desde Europa”**, con el objetivo de abrir un espacio de debate y reflexión sobre el impacto de la IA y contribuir a la formación y sensibilización sobre el uso responsable de las nuevas tecnologías y, más concretamente, de la IA.

El ciclo contó con destacados expertos en el ámbito nacional de la inteligencia artificial y estuvo compuesto por varias ponencias, tres de las cuales se

desarrollaron en el Salón de Grados de la FCCBA. Las conferencias realizadas en la Facultad fueron: “Inteligencia Artificial Generativa y Modelos del Lenguaje: Capacidades, Limitaciones y Desafíos Éticos”, impartida por María Teresa Martín Valdivia, catedrática en Ingeniería Informática por la Universidad de Jaén; “La inteligencia artificial que viene: una mirada desde Europa”, presentada por José Alberto Benítez Andrades, profesor de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de León y “Ficción, Atención y Sustitución: Los Nuevos Riesgos Sociales de la IA (Generativa)” dictada por Alejandro Rodríguez González, catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid y presidente de la Sociedad Española de Inteligencia Artificial en Biomedicina.

Durante los meses de septiembre a diciembre se celebró el III Ciclo de Conferencias de Investigación y Divulgación Científica de la FCCBA.

Este III ciclo de conferencias se inauguró el 24 de septiembre con una mesa redonda sobre los incendios forestales en la provincia de León moderada por Rayo Pinto Prieto, miembro de la Asociación de Investigadores en Formación de la ULE. En ella participaron profesores del área de Física aplicada: Andrés Merino Suances y Eduardo García Ortega y profesores del área de Ecología: Elena Marcos Porras, Iván Prieto Aguilar, José Manuel Fernández Guisuraga y Leonor Calvo Galván. Cada ponente expuso su labor investigadora ligada a varias temáticas que pasan por la crisis actual de los incendios y las aportaciones de la Universidad de León; el papel de la meteorología y el cambio climático en la propagación de los incendios forestales; la importancia del suelo como elemento crítico tras el fuego; el papel crucial de la inteligencia artificial y la teledetección en la evaluación de severidad y perímetros de incendio y, por último, la necesidad de trasladar este conocimiento a la sociedad a través de iniciativas como BIOMETAC, Expociencia o Plantando Cara al Fuego, especialmente en el medio rural.

En el marco de este III Ciclo de Conferencias de Investigación y Divulgación Científica se realizaron las siguientes charlas en el Aula Magna de la Facultad: “Acuicultura marina en Marruecos: Historia, situación actual y oportunidades de desarrollo” (Dr. Hassan Nhhala); “Clima y prevención en la era de la inteligencia artificial: observaciones y modelos numéricos para entender el presente y anticipar el futuro” (Dr. Andrés Navarro Martínez de la Casa); “El jardinero fiel: el papel del oso pardo en la regeneración de los ecosistemas” (Dr. Alberto García Rodríguez); “Hipoxia y resistencia terapéutica: cómo mejorar el tratamiento del hepatocarcinoma” (Dña. Tania Payo Serafín); “Exploring insect morphology using micro-CT imaging” (Dr. Xiao-Zhu Luo).

El objetivo de estas charlas es que los profesores de nueva incorporación den a conocer sus líneas de investigación y que podamos, no solo conocernos mejor, sino establecer futuras colaboraciones de investigación.

Cursos y talleres

Varios profesores de la Facultad participaron, como en ediciones anteriores, en la organización, dirección e impartición de **Cursos cero y Cursos de extensión universitaria**.

Los profesores Roberto López González y Fernando José Pereira García dirigieron y participaron como ponentes en el curso: “Química para titulaciones de grado en Ciencias Experimentales”, que tuvo lugar del 1 al 12 de septiembre. Dirigido a los alumnos de nuevo ingreso con el objetivo de repasar, afianzar y completar algunos conceptos fundamentales y básicos, ya estudiados en el Bachillerato y en la Formación Profesional, relacionados con la Química y su lenguaje, proporcionando bases metodológicas que faciliten el estudio de la Química de primer curso de Grado.

Los días 16 y 17 de octubre se impartió el curso titulado: “Herbario docente. Criptogamia”. Fue dirigido por Ana Belén Fernández Salegui, quien también participó como ponente junto con diversos profesores del Área de Botánica de la Facultad: Ana María Vega Maray, Arsenio Terrón Alfonso y Estrella Alfaro Saiz y con la colaboración de diversos alumnos del centro. El objetivo del curso fue comprender el valor didáctico y científico del herbario docente, su papel como recurso educativo en la enseñanza de la botánica y la biodiversidad, así como conocer los principios básicos de elaboración de un herbario y adquirir habilidades prácticas en la preparación de pliegos de diferentes grupos botánicos.

El 28 de noviembre se celebró en el Aula Magna de la Facultad un Taller de Liderazgo y Gestión de Equipos de Trabajo orientado a potenciar competencias en liderazgo, comunicación y gestión de equipos.

Innovación docente, divulgación científica y otras actividades

En el curso 2024-25, se celebró el primer **Concurso de Postales Científicas Navideñas**, en el que participaron 12 postales realizadas por los estudiantes y 7 postales elaboradas por el colectivo de PDI y PTGAS del Centro. Resultaron ganadores D. Jorge Peláez Blanco en la categoría de PDI y PTGAS (**Fig. 5**) y Dña. Paula Gómez de Agüero en la categoría de estudiantes (**Fig. 6**). Estas dos postales fueron las utilizadas para felicitar las navidades desde el Centro.

El PDI de la Facultad ha continuado durante este curso organizando y participando en actividades de innovación docente y divulgación científica.

El 31 de enero se celebró en nuestra Facultad la Fase local de **la VI Olimpiada de Geología**, con la participación de casi un centenar de alumnos interesados en el estudio y análisis de las Ciencias de la Tierra.

El 7 de febrero tuvo lugar la Fase Autonómica de Castilla y León de la **XX Olimpiada de Biología**. En ella participaron un total de 111 estudiantes de 2º de Bachillerato. Estas olimpiadas reflejan la gran importancia que la Biología tiene en nuestra sociedad ayudando a su progreso y divulgación.

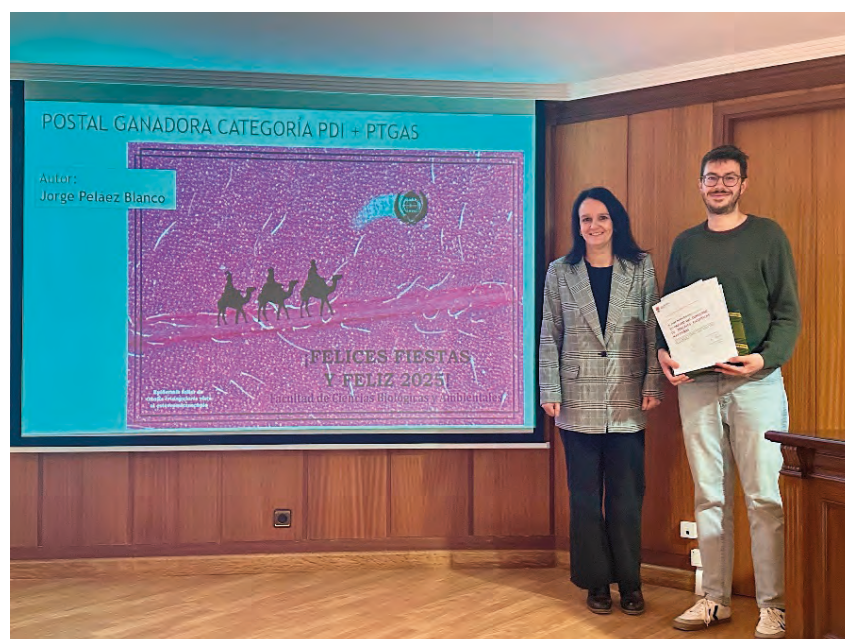


Figura 5. Postal Ganadora en la categoría PDI-PTGAS de Jorge Peláez Blanco.



Figura 6. Postal Ganadora en la categoría estudiantes de Paula Gómez de Agüero.

El 20 de febrero, 55 estudiantes de Bachillerato de 19 centros de León y provincia participaron en la fase local de la **Olimpiada Española de Física**, que se celebró de forma simultánea en la Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales y en el Campus de Ponferrada de la Universidad de León. El certamen, organizado desde el año 1990 por la Real Sociedad Española de Física con la co-

laboración de las universidades españolas, está dirigido a alumnos de 1º y 2º de Bachillerato con el objetivo de incentivar el interés de los estudiantes hacia esta disciplina.

La VI edición de **Expociencia Unileón** se celebró entre el 25 y el 27 de febrero en el Palacio de Congresos y Exposiciones de León y contó con la participación de 50 grupos de investigación, que organizaron un total de 52 talleres. El evento fue organizado por la Unidad de Cultura Científica e Innovación de la Universidad de León y contó con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) del Ministerio de Ciencia e Innovación y el Ayuntamiento de León. En esta edición participaron, organizando diversos talleres, numerosos profesores e investigadores de la Facultad. Así mismo, las asociaciones de Estudiantes de Biotecnología y de Biología participaron con un taller denominado: «¿Bio qué?» en el que mediante concursos y experimentos se descubrieron curiosidades de las diferentes áreas de la Biología. También se llevaron a cabo experimentos como la extracción de ADN a partir de saliva y la determinación del pH mediante extracto de lombarda. En estos talleres se explicaron las bases científicas detrás de cada experiencia, como la función y estructura del ADN o el uso de indicadores naturales de pH, acercando la biotecnología de forma divulgativa y amena y mostrando su aplicación en la vida cotidiana (**Fig. 7**).



Figura 7. Asociaciones de Biología y Biotecnología en la Expociencia Unileón 2025.

La iniciativa “Plant-a-Question”, que promueve la educación medioambiental a través de un nuevo y atractivo juego de mesa fue galardonado, el 13 de marzo, con el accésit al Premio a la Innovación en la enseñanza del Consejo Social de la ULe. La actividad fue propuesta por la profesora Sara del Río González, del Departamento de Biodiversidad y Gestión Ambiental de la FCCBA de la ULe.

La Facultad acogió, el 9 de abril, una Jornada del **Tour del Talento Princesa de Girona**. Bajo el lema “Una experiencia de Generación Talento”, la jornada se planteó como un espacio de encuentro entre estudiantes universitarios, jóvenes profesionales y representantes del tejido empresarial, con el objetivo de inspirar vocaciones, detectar oportunidades reales de crecimiento y reflexionar sobre el papel transformador del talento joven en la sociedad. En el Aula Magna recibimos a dos premiados por la Fundación Princesa de Girona que nos contaron sus experiencias personales y profesionales: Sergio Álvarez Leiva, cofundador de Carto, que revolucionó el análisis de datos geoespaciales ayudando a empresas y gobiernos a tomar decisiones estratégicas. Actualmente impulsa startups desde el Venture Capital, mostrando cómo la innovación tecnológica puede transformar sectores enteros, y Pepita Marín Rey-Stolle, Fundadora de We Are Knitters, que transformó el mundo de la moda sostenible, creando una comunidad global que valora la creatividad y el estilo de vida “Do It Yourself”, impulsando una forma más consciente y ecológica de consumir moda.

El viernes 7 de mayo, se celebró en la Facultad una iniciativa pionera en la conexión entre universidad y empresa, denominada “**BioHackathon**”. Consiste en una jornada intensiva en la que estudiantes trabajan en equipo para resolver desafíos reales propuestos por tres empresas líderes del entorno leonés, como mAbxience, empresa dedicada al desarrollo de medicamentos biotecnológicos; Vexiza, especializada en soluciones de análisis de datos y Más que Pájaros, consultora ambiental con amplia trayectoria en biodiversidad (**Fig. 8**).



Figura 8. Cartel BioHackaton.

La actividad, que se presentó como una experiencia formativa práctica, dinámica y multidisciplinar, fue organizada por el Vicerrectorado de Emprendimiento, Empleabilidad y Formación Permanente, en colaboración con la FCCBA. Reunió a más de 40 estudiantes de diferentes grados, másteres y doctorados vinculados a los ámbitos biosanitario, biotecnológico, farmacéutico y ambiental. Durante la jornada se realizó, además, música en directo, actividades sociales, sorteo de entradas y un programa de radio en vivo, teniendo el evento no solo un componente académico y profesional, sino también un ambiente lúdico y social. Los tres equipos ganadores recibieron un premio de 300 euros.

El 22 de mayo se realizó en la Facultad una **Jornada Divulgativa sobre Ciencia y Gestión** titulada “Urogallo cantábrico: el gran reto de la conservación”, que contó con la participación de expertos del MITECO, la Fundación Patrimonio Natural, la Junta de Castilla y León, la Universidad de Exeter (Reino Unido) y la Universidad de León. Tras una serie de ponencias breves, se celebró una mesa redonda en la que se abordaron los principales desafíos que enfrenta esta especie emblemática de nuestra fauna.

Las conferencias fueron realizadas por Beatriz Blanco Fontao: “Urogallo cantábrico: poblaciones en la periferia”; Rubén Moreno-Opo: “Estrategia para la conservación del urogallo en España”; Daniel Pinto: “El urogallo en Castilla y León. Monitorización de la especie y acciones de conservación”; Gabriel de Pedro: “Cría en cautividad del urogallo. Centro de cría de Valsemana”; Rolando Rodríguez-Muñoz: “Gestión del urogallo cantábrico en tiempos de posverdad”.

El viernes día 4 de julio se desarrolló en el Aula Magna San Isidoro del Rectorado de la ULe el acto de **Graduación de las promociones 2024-25** de la FCCBA (**Fig. 9**). El catedrático de Microbiología de la Universidad de León, Jesús Aparicio Fernández, pronunció la conferencia: “Microbiota; nuestros compañeros de viaje” (**Fig. 10**).

La Universidad de León se sumó un año más a la **Noche europea de I@s investigador@s**, una cita internacional que tuvo lugar el 26 de septiembre con intención de acercar la ciencia y la innovación a la sociedad de una manera participativa. Con el lema “Tu primera cita con la ciencia”, se realizaron más de 30 actividades. Este evento está coordinado por la Unidad de Cultura Científica e Innovación dependiente del Vicerrectorado de Investigación y Transferencia. Los asistentes pudieron disfrutar de microcharlas, monólogos científicos, talleres interactivos, actividades gamificadas como un *escape room* sostenible o una *gymkana* cultural, simulaciones de procesos naturales y hasta una cata de miel pensada para los más pequeños. También se ofrecieron rutas guiadas por la ciudad y visitas al Museo de Colecciones de la ULE (MULE).

La Facultad, con el apoyo de la Fundación Carolina Rodríguez, ha organizado este año el **XVIII Curso de Actualidad Científica y Cultural de la ULe**. Desde del 21 de octubre al 1 de diciembre se impartieron, en el Aula Magna, doce conferencias de divulgación científica sobre temas muy diversos, con el

objetivo de que los estudiantes adquirieran conocimientos de temas de actualidad científica y cultural, fundamentalmente relacionados con los Retos Globales y la investigación, enfocados desde diversos ámbitos (Biología, Derecho, Veterinaria, Filosofía, Humanidades o Ciencias Sociales).



Figura 9. Acto Académico de la Graduación de las Promociones 2024-25 de la FCCBA.



Figura 10. Conferencia del Acto Académico de la Graduación.

El curso de este año se dedicó a los Retos Globales, con un enfoque interdisciplinar que abordó cuestiones como el cambio climático, la salud pública, la seguridad alimentaria, las migraciones, la desigualdad en el acceso a recursos básicos, los límites del crecimiento, la crisis de sostenibilidad o los desafíos tecnológicos y jurídicos internacionales.

Las doce ponencias que integraron el ciclo fueron las siguientes: “Arma-mento letal autónomo” (Roser Martínez Quirante), experta en ética de la inteligencia artificial (Universidad Autónoma de Barcelona – UAB); “El reto global del cambio climático desde las humanidades” (José Manuel Marrero Henríquez), profesor de literatura y ecocrítica (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria); “Virología y salud pública”(Elisa Pérez Ramírez) (Centro de Investigación en Sanidad Animal – INIA CESID); “La crisis de sostenibilidad del siglo XXI”(Antonio Turiel), conocido por su labor divulgativa en torno a los límites del crecimiento y la crisis energética (Instituto de ciencias del Mar del CSIC); “Agricultura, transgénicos y salud alimentaria” (Miguel Mulet Salot), especialista en bioquímica y biotecnología (Universitat Politècnica de Valencia); “One Health Salud Global: la nueva estrategia frente a la amenaza medioambiental” (Ignacio López Goñi), microbiólogo y divulgador científico (Universidad de Navarra); “Cirugía personalizada al alcance de todos” (Alejandro Reyero Huerga), experto en tecnología biomédica (Digital Anatomics); “Producción, consumo de carne y huella ecológica” (Javier Giráldez) (Instituto de Ganadería de Montaña); “Investigación y conservación de chimpancés: el enfoque holístico del Instituto Jane Goodall en África” (Federico Bogdanowicz) (Instituto Jane Goodall España/Senegal); “Retos globales desde la perspectiva jurídica internacional” (Andrés Rodríguez Benot), catedrático de Derecho Internacional Privado (Universidad Pablo de Olavide); “Las migraciones y el lenguaje poético: retos del presente” (María Ángeles Pérez López), poeta y profesora de la Universidad de Salamanca y “Los retos geográficos locales” (Jorge Olcina Cantos), experto en climatología y riesgos naturales (Universidad de Alicante).

La **Delegación de Estudiantes de la Facultad** realizó diversas actividades. Destaca la desarrollada el 28 de mayo con motivo de la celebración del Día Internacional del Reciclaje, en colaboración con el Área de Sostenibilidad y Calidad Ambiental, el Ayuntamiento de León, y con el apoyo de la Facultad, ABLe, BIOMA y JEULe. En un stand situado en la zona verde que se encuentra frente a la Facultad, se desarrolló un juego en el que los participantes debían colocar diversos residuos de manera correcta en los contenedores adecuados. Con esta iniciativa se pretendió concienciar a la comunidad universitaria de la importancia del reciclaje para proteger el medio ambiente. Para ello se ofreció información y se regalaron artículos para separar en casa los residuos de manera apropiada.

Entre las actividades de formación y divulgación científica que organiza ABLe, destaca la visita organizada, para los alumnos de primero y segundo curso del Grado en Biotecnología, al Instituto de Biomedicina de la Universidad de

León (IBIOMED), donde pudieron conocer las instalaciones y las investigaciones que se llevan a cabo.

Además, la asociación ABLe, junto con la Asociación de Investigadores en Formación de la ULe (AIF-ULE), organizaron, a finales de junio, un ciclo de charlas en el Café Varsovia, denominado “Tragos de Ciencia”. En el evento participaron estudiantes de doctorado que impartieron las charlas: “Tu microbiota marca la diferencia” (Alba María González Robles); “Lentejas, genética y cambio climático” (Andrea Fernández Gutiérrez); y “Vitivinicultura ante el cambio climático: desafíos y oportunidades” (Aitor Álvarez Santacoloma).

Este año tuvo lugar la **XIV Edición de Biotechnofarm**, durante los meses de enero y abril, organizado por ABLe, junto con la Federación Española de Biotecnólogos. En Biotechnofarm se desarrollan talleres de Biotecnología orientados a estudiantes de 4º de E.S.O. y de Bachillerato con el objetivo de fomentar la cultura científica y la innovación en la sociedad, destacando la importancia de la innovación en los diferentes campos que abarca la Biotecnología. En esta edición se realizó un taller en el Centro Penitenciario de León.

El grupo de investigación educativa **BIOMETAC** realiza diversas experiencias en el marco de Proyectos de Innovación Docente de la Universidad de León. Este grupo está formado por profesores, pertenecientes a diversas áreas de conocimiento relacionadas con las ciencias de la vida y la tierra, y por estudiantes voluntarios de tercer y cuarto curso de los Grados de Biología, Biotecnología y Ciencias Ambientales, que transforman la divulgación en una experiencia cercana, divertida y colaborativa.

El GID Biometac puso en marcha, este curso 2025-26, la segunda edición de “Caravana Biometac” que recorrió cuatro municipios rurales: Argovejo (Crémenes), Bembibre, Llamas de la Ribera y Zotes del Páramo. En cada parada, profesores y estudiantes de la Facultad organizaron talleres gratuitos y abiertos a todo el público. En cada uno de los municipios se realizaron siete talleres en torno a temas de gran actualidad relacionados con alimentación, salud y medio ambiente, con un enfoque práctico y cercano. Tanto el diseño de los talleres como la elaboración de los materiales y el trabajo que requiere su puesta en marcha han sido llevados a cabo por profesores y alumnos de la Facultad. Este proyecto pretende fortalecer los lazos entre la Universidad y la sociedad, llevando el conocimiento científico a entornos rurales y fomentando el diálogo entre estudiantes, profesorado y la ciudadanía.

Terminamos el año con la aprobación, el 22 de octubre, por parte del Consejo de Gobierno de la Universidad de León, de la propuesta de concesión del grado Doctor Honoris Causa al científico César de la Fuente Núñez, doctor catedrático en la Universidad de Pennsylvania (EE. UU.) (**Fig. 11**).

La propuesta se aprobó por unanimidad de todos los miembros del Consejo de Gobierno. La rectora de la Universidad de León calificó de “excepcional”

la contribución de César de la Fuente, referente internacional en la aplicación del uso de la inteligencia artificial para el desarrollo de nuevos medicamentos.

Tras la aprobación en Consejo de Gobierno se elevará para su aprobación definitiva al Claustro de Doctores, que previsiblemente se reunirá el próximo 17 de diciembre.

El día 27 de noviembre se presentó en el Aula Magna de la Facultad el informe: “Afecciones a la biodiversidad protegida y/o amenazada por los grandes incendios de la Cordillera Cantábrica”, elaborado por el Grupo de Trabajo para la conservación de la Biodiversidad de la Cordillera Cantábrica. El grupo está integrado por especialistas de la Universidad de León, la Complutense de Madrid, la Estación Biológica de Doñana (CSIC) y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Posteriormente se desarrolló una mesa redonda en la que también participaron los miembros del grupo de trabajo y otros investigadores invitados.



Figura 11. César de la Fuente en el laboratorio que lleva su nombre.

Festividad de San Alberto Magno

El viernes 14 de noviembre celebramos, un año más, la festividad de nuestro patrón, San Alberto Magno. Dentro de las actividades organizadas en el programa de San Alberto destacó el *GIScape-room* en las aulas de la Facultad, organizado por el grupo de Investigación Q-GEO y las conferencias: “Cirugía personalizada al alcance de todos” (Alejandro Reyero Huerga); “Conociendo a los murciélagos” Proyecto Murciélagos cavernícolas de la Sierra de Bodoquens, Brasil, (Aléxia Murgi); “Producción y consumo de carne y huella ecológica: enseñando a dudar de lo enseñado” (Javier Giráldez).

El Acto Académico tuvo lugar en el Aula Magna de la Facultad y fue presidido por la Sra. Rectora Magnífica Dña. Nuria González y la Decana de la Facultad Dña. Laura López Campano. La conferencia titulada: “¿Cómo se comunican las proteínas? Una historia sobre curiosidad y motivación” fue realizada por la Dra. Cristina Viéitez Manrique, egresada de nuestra Facultad, licenciada en Biología en 2008 y actualmente investigadora en el Instituto de Biología Funcional y Genómica de Salamanca, donde libera un grupo de investigación dedicado a la comunicación entre proteínas. La Dra. Viéitez ha sido galardonada con diferentes premios como el Premio Christiane Nüsslein-Vollhard Foundation Award for Excellent Female Scientists en Alemania (2021), el Premio “*For Women in Science*” 2023 de la Fundación L’Oréal-UNESCO, el Premio INNOVA (2023) y el Premio ICAL (2024).

Se entregaron distinciones honoríficas a los Profesores de la Facultad jubilados durante el curso 2024-25, se impusieron las becas a los licenciados en Biología de la promoción 1995-2000 (**Fig. 12**) y a los licenciados en Ciencias Ambientales de la promoción 1996-2000 (**Fig. 13**). También se realizó un homenaje a los alumnos de la 4ª promoción de Biología 1970-1975 por su 50 aniversario (**Fig. 14**).

Se anunció además la concesión de los Premios Extraordinarios Fin de Carrera de los Grados de Biología, Biotecnología y Ciencias Ambientales, así como la concesión de los Premios Anuales: “*DSM-Firmenich-Vitatene Awards for Academic Excellence*”, “Premio Fin de Carrera a la Excelencia Académica Insud Pharma S.L.” y “*Vexiza Awards for Academic Excellence*”.



Figura 12. Licenciados en Biología de la promoción 1995-2000 en su 25 aniversario.



Figura 13. Licenciados en Ciencias Ambientales de la promoción 1996-2000 en su 25 aniversario.



Figura 14. Cuarta promoción de Biología 1970-1975 en su 50 aniversario.

Si tienes alguna sugerencia o quieres
enviarnos tus artículos, tu proyecto de tesis
o alguna fotografía para
la portada, ponte en contacto con nosotros:

ambiociencias@unileon.es

La edición electrónica de la revista se
puede consultar en:
<http://centros.unileon.es/biologia/ambiociencias1/>



En contraportada: logotipo diseñado por el Dr. Estanislao de Luis Calabuig como anuncio del quincuagésimo aniversario de los estudios de Biología en León.



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES. UNIVERSIDAD DE LEÓN