

MOLEQLA

n°
35

Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide

ISSN 2173-0903

Portada

Julio Ezequiel Pérez Carbajo

Logotipo y Título de la revista

Juan Manuel García Arcos, Rafael Hoyos Manchado y Rafael Iigo
Roció Escudero Ávila, Inés Maldonado Lasunción y Javier Revello Sánchez

Plantilla de la revista

Norberto Díaz Díaz

Editores de las secciones que aparecen en este número

MoleQla Informática: Norberto Díaz Díaz

MoleQla Química: Patrick J. Merkling

MoleQla Energía: Juan José Gutiérrez Sevillano

MoleQla Deporte: Alberto Grao Cruces

MoleQla Nanotecnología: Ana Paula Zaderenko Partida

MoleQla Biotecnología: Cristina Guillén Mendoza

MoleQla Ambiental: Ana Martín Calvo

MoleQla Patrimonio: María Pilar Ortiz Calderón

Responsable de Maquetación

Francisco Araque Frías

Información sobre todas las secciones de MoleQla en <http://www.upo.es/MoleQla>

Editores

Sofía Calero Díaz

Ana Paula Zaderenko Partida

Juan Antonio Anta Montalvo

Patrick J. Merkling



ISSN 2173-0903

Editado el 16 de octubre de 2019

Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España

Podríamos decir que coincidiendo con la Cumbre del Clima recientemente celebrada en Nueva York el pasado septiembre (<https://www.un.org/en/climatechange/events.shtml>) se ha vivido a nivel mundial un salto cualitativo en lo que se refiere a la preocupación de la sociedad por el cambio climático. Millones de jóvenes han salido a las calles para exigir soluciones de los políticos que los gobiernan y el término “emergencia climática” ha empezado a estar en boca de destacados actores de la opinión pública. Este mismo número de otoño llega acompañado por un tiempo especialmente cálido, y aunque no es correcto identificar el clima con el tiempo, lo cierto es que un cambio drástico en los patrones climáticos del planeta Tierra ya resulta claramente percibido por la población.

Aunque el calentamiento global parece haber convencido de repente por fin a muchos, lo cierto es que los científicos llevan alertando de los efectos dañinos del efecto invernadero desde hace décadas. Esto es un hecho innegable, no solo por las innumerables estadísticas que recopilan datos de temperatura y de nivel del mar, sino por las conocidas propiedades fotofísicas de los gases de efecto invernadero, como el CO₂ y el metano, sustancias que las sociedades industriales liberan en grandes cantidades. Como explicamos a nuestros estudiantes de grado y de máster en Ciencias Ambientales y en Biotecnología, estas moléculas absorben fuertemente la radiación infrarroja que emite la Tierra. Un incremento de la concentración de estos gases en la atmósfera necesariamente implica un calentamiento, y el único debate posible es en qué magnitud dicho calentamiento se producirá. Lo que resulta obvio para el científico no lo es para dirigentes embrutecidos que por ignorancia o intereses (ya sea económicos o electorales) se apuntan al malhadado *negacionismo*.

Son precisamente científicos en preparación, estudiantes de las carreras de ciencias de la Pablo de Olavide, los que contribuyen principalmente a las sucesivas publicaciones de la Revista MoleQla. En esta edición, que completa nada más y nada menos que 35 números desde el primero que se publicó allá por diciembre de 2010, contamos con artículos en las secciones de Química, Energía, Deporte, Nano y Biotecnología, Medio Ambiente, Patrimonio e Informática. Destacan los trabajos sobre biocombustibles, contaminación de aguas y biodegradación de plásticos, artículos sobre robótica y videojuegos, e interesantes *narraciones* químicas sobre la relación del gas radón y el cáncer de pulmón, o la síntesis del amoníaco, que tantas implicaciones tuvo en la historia de occidente.

El equipo editorial de MoleQla os desea una placentera lectura y un agradable y cálido (a pesar de todo) otoño.



Juan Antonio Anta
Editor de la Revista MoleQla

ÍNDICE

1. *Moleqta Informática*

- 1.1. CommonKADS y Sistemas Basados en Conocimiento
- 1.2. La robótica en la cirugía
- 1.3. Los videojuegos no fríen tu cerebro, lo entrenan

2. *Moleqta Química*

- 2.1. Gas radón y cáncer de pulmón
- 2.2. Ammonia synthesis and its utility

3. *Moleqta Energía*

- 3.1. Biocombustibles: tipos y estrategias de producción

4. *Moleqta Deporte*

- 4.1. Efectividad de intervenciones de actividad física dirigidas desde la escuela sobre el rendimiento académico y desarrollo cognitivo del alumnado

5. *Moleqta Nanotecnología*

- 5.1. “Nanoscaffolds” para la regeneración de lesiones medulares

6. *Moleqta Biotecnología*

- 6.1. Aplicaciones biotecnológicas a la degradación de residuos plásticos

7. *Moleqta Ambiental*

- 7.1. Contaminantes Químicos del Agua: Contaminación Antropogénica

8. *Moleqta Patrimonio*

- 8.1. Microclima: evaluación en el contexto de la conservación del Patrimonio Histórico

CommonKADS y Sistemas Basados en Conocimiento

Álvaro Navarro Mora

Resumen—Este artículo presenta la metodología de desarrollo CommonKADS y expresa su utilidad para el desarrollo de sistemas basados en conocimiento y el gran beneficio que aportan estos en la toma de decisiones.

Palabras Claves— Metodología, Desarrollo, Conocimiento, Información, Sistema, CommonKads, Experto, Aprendizaje.



1. INTRODUCCIÓN

Cada vez es más común escuchar hablar de la inteligencia artificial y de la creciente presencia de esta en nuestras vidas. Cada vez son más las empresas que desean emplear estas técnicas y esto obliga a los desarrolladores a buscar formas de integrar estas técnicas en los sistemas.

Una de las aplicaciones de la inteligencia artificial son los sistemas basados en conocimiento, que resultan de gran utilidad para la toma de decisiones de las compañías.

CommonKads (Knowledge Analysis and Documentation System)[1] es una metodología de desarrollo creada específicamente para la confección de sistemas de conocimiento por lo que es una herramienta que se adapta realmente bien a las necesidades de los desarrolladores que se dedican a estas tareas.

2. DATOS, INFORMACIÓN Y CONOCIMIENTO

El factor diferencial de los Sistemas de Conocimiento frente a los Sistemas de Información convencionales es el producto que ofrecen, información frente a conocimiento. Por ello es conveniente conocer las diferencias entre estos conceptos:

- Un dato es una representación simbólica de un atributo de una entidad, que por si mismo carece de significado hasta que es puesto en un contexto.
- La información son los datos puestos en un contexto, ya tiene un significado y es de utilidad para el usuario.
- El conocimiento es el resultado de un aprendizaje a partir de la información disponible.

3. SISTEMAS BASADOS EN CONOCIMIENTO

Los sistemas basados en conocimiento son aquellas aplicaciones que representan el conocimiento necesario para la resolución de una tipología determinada de problemas[2].

Un tipo de sistemas basados en conocimientos son los sistemas expertos (SE)[3]. Estos contienen conocimiento sobre un determinado dominio y aplican técnicas de razonamiento sobre este. De esta forma pueden desarrollar tareas que normalmente requieren expertos humanos.

Este proceso de representación del conocimiento sobre un determinado dominio, y la manipulación de este se conoce como ingeniería del conocimiento[4]. Esta tarea requiere de un experto en el dominio y de un ingeniero del conocimiento que ejerce de intérprete entre humano y máquina, plasmando el conocimiento del experto de forma que la máquina pueda trabajar con este.

4. LA METODOLOGÍA COMMONKADS

4.1. CommonKADS y la ingeniería del conocimiento

La metodología CommonKADS ofrece herramientas para el modelado de sistemas basados en conocimiento, por tanto, es un instrumento muy útil y completo para la ingeniería del conocimiento[5].

4.2. Grupos de modelos

Existen tres tipos de preguntas que deben hacerse y un grupo de modelos para cada una de ellas:

- ¿Por qué? Debemos preguntarnos si la implantación del sistema va a revertir en alguna mejora y beneficios para la organización. Para responder a

estas preguntas es importante conocer la estructura de la organización, que tareas va a desarrollar el sistema y que personas van a interactuar con el. Estas cuestiones son estudiadas por el grupo de modelos llamado contexto.

- ¿Qué? La segunda pregunta hace referencia a qué tipo de conocimiento se va a manejar y cómo va a ser estructurado. También es importante conocer quién va a recibir este conocimiento y cómo se le va a transmitir. De aquí surge el grupo de concepto.
- ¿Cómo? La tercera cuestión hace referencia a cómo manejar el conocimiento mediante una computadora. Es la parte relacionada con la arquitectura software y con el modelo de diseño. Este tercer grupo es conocido como equipo.

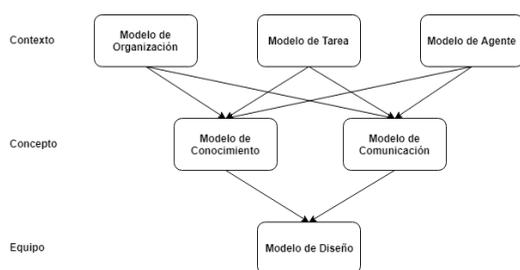


Fig. 1. Modelos de conocimiento 1

4.3. Modelos de conocimiento

Las respuestas a las preguntas planteadas originan los siguientes modelos[3]:

- Modelo de organización: consiste en el análisis de la organización en la que se va a implantar el sistema, estudiar la viabilidad del proyecto y estudiar los impactos que tendrá.
- Modelo de tarea: es la parte correspondiente al modelo de negocio. Analiza las funciones que deberá realizar el sistema de forma global y los recursos que serán necesarios.
- Modelo de agente: estudia que agentes ejecutan las tareas. Un agente puede ser un sistema de información, un humano o cualquier entidad que desempeñe una tarea. También establece las relaciones y comunicaciones entre los agentes.
- Modelo de conocimiento: es aquel que desempeña la labor de describir las estructuras de

conocimiento utilizadas y qué papel realiza cada componente en la resolución de problemas.

- Modelo de comunicación: modela las transacciones entre los agentes implicados en una tarea.
- Modelo de diseño: los modelos anteriores especifican unos requisitos para el sistema, cada uno desde un punto de vista diferente. Basándose en estos requisitos, este modelo proporciona la especificación técnica del sistema para implementar las funciones propuestas.

5. TÉCNICAS DE ADQUISICIÓN DE CONOCIMIENTO

El sistema debe tener la capacidad de adquirir el conocimiento para posteriormente ofrecérselo al usuario, esta extracción del de conocimiento puede llevarse a cabo de diversas formas[3].

5.1. Técnicas manuales

Consisten principalmente en la obtención del conocimiento a partir de expertos en el dominio de estudio, siendo transformada por los ingenieros del conocimiento. Pueden realizarse entrevistas, cuestionarios o simplemente observar al experto mientras trabaja.

5.2. Técnicas automáticas

Son aquellas en las que el sistema realiza el aprendizaje por si mismo, de esta forma se reduce el esfuerzo, tiempo y recursos necesarios para llevar a cabo esta tarea. Suelen aplicarse técnicas de aprendizaje como redes neuronales.

5.3. Técnicas semiautomáticas

Situadas entre las dos anteriores, hacen uso del conocimiento del experto, pero esta vez aplicando técnicas de escalamiento o de clusters, de forma que complementamos la información aportada por el experto.

6. CONCLUSIONES

Dado al creciente uso de técnicas para la adquisición de conocimiento y de la gran relevancia de este en la sociedad actual se ha dado la necesidad de desarrollar herramientas que nos ayuden en esta tarea. Pese a que hay más herramientas como CommonKADS, la mayoría son derivaciones de esta y, por lo tanto, tienen la misma base. Será crucial en el futuro, que toda persona interesada en esta área este familiarizada con este tipo de herramientas.

REFERENCIAS

- [1] Web de CommonKads. <https://commonkads.org/>
- [2] Gómez, N. Juristo, C. Montes y J. Pazos, *Ingeniería del Conocimiento*. Centro de estudios Ramón Areces. Madrid, 1997.
- [3] Gonzalo Pajares Martinsanz, Matilde Santos Peñas, *Inteligencia Artificial e Ingeniería del Conocimiento*. RA-MA 2005, pp. 45-47, 96-97, 115-123, 155-157, 2005.
- [4] A. Gonzalez y D. Dankel, *The Engineering of Knowledge-Base Systems*. Theory and Practice, Prentice-Hall, 1993.
- [5] Giraldo, I. y Montoya, D. (2015). *Aplicación de la metodología de Commonkads en la gestión del conocimiento*. Revista CEA, 1(2), 99-108.



Álvaro Navarro Mora estudia el segundo curso de Ingeniería Informática en Sistemas de Información en la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla).

La robótica en la cirugía

Andrés Manuel Chacón Maldonado

Resumen—La cirugía ha sufrido grandes cambios en los últimos años gracias al gran avance producido en la tecnología. Los robots se presentan a la vanguardia en este campo mejorando diversos aspectos ayudando así a los profesionales en el desempeño de su trabajo.

Palabras Claves— Cirugía, Da Vinci, Medicina, Robótica, ZEUS.

1. INTRODUCCIÓN

La medicina ha experimentado grandes cambios en sus diversos campos gracias a los avances tecnológicos producidos en los últimos años. En el campo de la cirugía, estos cambios han venido principalmente de la mano de la robótica [1].

La cirugía robótica es ciencia ficción convertida en realidad. Se considera el futuro de la cirugía debido a los importantes avances sufridos y al gran impacto causado durante las últimas dos décadas. Ha tenido un gran desarrollo y ha demostrado tener numerosas ventajas que ayudan a mejorar las técnicas quirúrgicas y por consiguiente, a los pacientes. Debido a esto, se han producido cambios en la práctica y la enseñanza de la cirugía.

La cirugía asistida por robot permite a los médicos hacer diferentes tipos de procedimientos complejos con mayor precisión, flexibilidad y control en comparación con las técnicas convencionales. La cirugía robótica en general se asocia con la cirugía de invasión mínima (el procedimiento se realiza a través de pequeñas incisiones) [2].

2. HISTORIA DE LA ROBÓTICA EN LA MEDICINA

Primeramente, la palabra "robot" proviene del checo; según la RAE (Real Academia Española) quiere decir "trabajo o prestación personal y la define como "Máquina o ingenio electrónico programable que es capaz de manipular objetos y realizar diversas operaciones" [3].

La concepción popular del robot comienza en 1921 cuando el escritor checo Karel Capek, utilizó por primera vez el término robot, en su drama "Rossum Universal Robots" [1]. Posteriormente en 1942, Isaac Asimov (escritor y profesor de bioquímica en la facultad de medicina de la Universidad de Boston de origen ruso [4]), fue el primero en utilizar el término "robotics" para referirse a la tecnología robótica, estableciendo las tres leyes de la robótica en sus obras *Círculo vicioso* y *Yo, robot*.

Las primeras especialidades quirúrgicas donde se utilizaron los robots fueron la neurocirugía y la traumatología. En neurocirugía, los robots se utilizaron en diferentes intervenciones que requerían una localización anatómica exacta, mejor visualización del campo operatorio, destrezas y precisión en las maniobras. En 1985, en una biopsia

quirúrgica mediante punción, se utilizó el robot PUMA 560, un brazo robótico industrial. A partir de ahí, se desarrollaron robots cirujanos como World First, RoboDoc, Zeus, AESOP Y Da Vinci, entre otros.

En traumatología y ortopedia, el RoboDoc fue desarrollado para asistir a los cirujanos en la colocación de prótesis de cadera. Utilizando el RoboDoc, el hueso puede ser seccionado para luego colocar la prótesis con una precisión diez veces mayor que con la técnica manual [5].

2.1. Evolución de los robots

En 1993, aparece AESOP un sistema endoscópico automático para posicionamiento óptimo y el primero en ser aprobado por la FDA (agencia de Administración de Alimentos y Medicamentos del gobierno de los Estados Unidos) para intervenciones quirúrgicas abdominales, diseñado por Computer Motion, y aprobado en 1994. Se trata de un brazo robótico que sujeta una cámara laparoscópica (cámara que se utiliza en cirugías mínimamente invasivas), que puede ser controlado por voz. Las últimas generaciones, han añadido un mayor rango de movimiento para intentar simular la mano humana [6].

En 1998, se lanzó al mercado el sistema ZEUS también desarrollado por Computer Motion, con él se introdujo el concepto de telerrobótica. Compuesto por una consola de control para el cirujano con un sistema de vídeo tridimensional que proyecta imágenes desde una determinada distancia, y una mesa operatoria con tres brazos robóticos con cuatro rangos de movimiento, facilitó que, gracias a él, en 2001, se realizara la primera intervención quirúrgica transatlántica. Los brazos derecho e izquierdo simulan los brazos del cirujano, mientras que el tercer brazo es un endoscopio robótico AESOP® controlado por voz. Todo hasta el momento parece demasiado bonito para ser cierto, y es que, el problema de ZEUS era el gran tamaño de sus brazos robóticos y la incomodidad de ser necesario llevar unas gafas especiales [2].

En 2003, aparece Da Vinci, el robot quirúrgico más completo y usado hoy en día por los médicos para realizar cirugías.

3. DA VINCI

La fusión de dos empresas con sede en Silicon Valley, California (Computer Motion y Da Vinci Surgical System, de

Intuitive), dio lugar a la INTUITIVE SURGICAL INC (2003), cuyo producto final es el sistema de telemanipulación robótica Da Vinci, en honor a Leonardo Da Vinci (1452): artista, inventor, descubridor, astrónomo, pintor (La Gioconda), anatomista, ingeniero y militar [1].

El sistema Quirúrgico Da Vinci es el instrumento quirúrgico más sofisticado existente. Es un robot esclavo, que obedece al cirujano a la vez que aumenta su capacidad para operar con precisión y destreza, reduciendo el temblor y proporcionando una visión excepcionalmente clara de la anatomía del paciente [8].

Está compuesto por una consola de diseño ergonómico para el cirujano, un carro con cuatro brazos robóticos, un sistema de visualización de alta calidad y los instrumentos patentados Endo Wrist, que son los propios de una operación quirúrgica, pero adaptados para fijarse al final de los brazos robóticos e ideados para permitir al profesional mantener su destreza natural [7] (Figura 1).

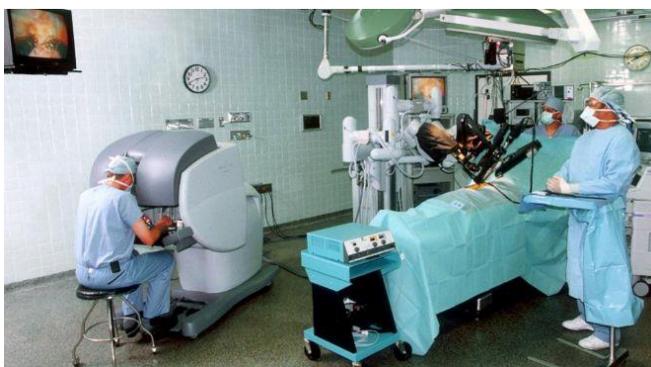


Figura 1. Robot quirúrgico Da Vinci. Consola Mestra y brazos robóticos. Adaptada de [7].

En esta consola es posible además visualizar simultáneamente las pruebas de imagen que se realizaron antes de la cirugía. La consola permite también utilizar un sistema de fluorescencia que ayuda al cirujano a localizar los vasos sanguíneos, permitiendo reducir el sangrado durante las operaciones.

El sistema recibe las órdenes en tiempo real y permite realizar los movimientos naturales de las manos, muñecas y dedos del cirujano.

3.1. Implantación en España

El Hospital Clínico San Carlos de Madrid, fue el primero del Sistema Nacional de Salud en disponer del robot Da Vinci para realizar cirugía de telepresencia o cirugía robótica.

Hoy en día, España tiene un total de más de 50 robots Da Vinci distribuidos en diversos hospitales a lo largo de las diferentes comunidades autónomas. La última en aumentar dicho número fue la Comunidad de Madrid con la adquisición de seis nuevos robots a principios de 2019.

La empresa encargada de hacer esto posible, es ABEX Excelencia Robótica, una empresa española que se ocupa desde 2016 de implementar y desarrollar programas de cirugía robótica en España y Portugal a través del sistema robótico da Vinci.

Los cirujanos que realizan cualquier tipo de intervención con un sistema robótico Da Vinci llevan a cabo un proceso de formación constante, donde la curva de aprendizaje se realiza a través de intervenciones sencillas aumentando, de forma progresiva, la complejidad según se vaya adquiriendo experiencia.

Estos programas de formación no sólo los reciben los cirujanos especialistas, también se imparten al equipo que trabaja con el cirujano durante las intervenciones. En este sentido, cabe destacar que más de la mitad de la plantilla de ABEX Excelencia Robótica está dedicada a la formación, lo cual demuestra la importancia que la compañía le da a este factor [11].

Las ventajas en todo caso de usar este robot son notables para los cirujanos, que obtienen una visión mejorada y aumentada en las intervenciones, así como una mayor destreza y precisión. Los beneficios para los pacientes también son varios: sufren menos dolores postoperatorios, se ahorran noches de hospital (a los dos días suelen recibir el alta) y pierden mucha menos sangre que con la cirugía abierta.

4. ALTERNATIVAS A DA VINCI

Algo malo tendría que tener Da Vinci y es que, hacerse con los servicios de este robot cuesta alrededor de 2 millones de euros, sin tener en cuenta el mantenimiento y la formación de los profesionales [12].

Por esta razón, la mayoría de los hospitales del mundo están intentado encontrar alternativas a dicho robot, entre varias propuestas caben destacar dos de ellas: el robot FlexDex y el robot Bitrack System.

4.1. FlexDex

Unos investigadores de la Universidad de Michigan (Estados Unidos), desarrollaron dicho robot, con la visión de una maquinaria mucho más barata y que traduce con precisión los movimientos de la mano, la muñeca y el brazo del cirujano en una intervención quirúrgica, además, y no menos importante, con un coste de menos de 500 euros.

El sistema, pretende ayudar a los médicos de aquellos hospitales que tienen menores recursos económicos y, por ende, tecnológicos. Así, el objetivo central del dispositivo es permitir a estos centros realizar procedimientos médicos muy precisos que actualmente solo pueden llevarse a cabo en hospitales punteros [9].

Este nuevo dispositivo, comercializado por la firma FlexDex Surgical, es un instrumento para la mano especializado en pequeñas incisiones y suturas, el cual se coloca en el brazo del cirujano con su centro de rotación en el



mismo punto que la muñeca del médico, de manera que funciona como una extensión del brazo (Figura 2).

Figura 2. Robot quirúrgico FlexDex. Adaptada de [10].

La herramienta tecnológica ha demostrado con éxito sus capacidades, al ser empleado en una cirugía abdominal en el Sistema de Salud de la Universidad de Michigan y sus creadores afirmaron que puede emplearse en otros procedimientos tales como reparaciones de hernia, histerectomías y prostatectomías.

Sus creadores, Awatar y Geiger, han enfatizado en que su dispositivo no pretende sustituir a los Da Vinci que ya están implantados en diversos sistemas sanitarios a nivel global. FlexDex, según señalan los diseñadores, ayudará a llevar cirugías mínimamente invasivas a partes del mundo donde muchos procedimientos se siguen haciendo mediante cirugías tradicionales.

4.2. Bitrack

Fue desarrollado por la empresa española Rob Surgical, bajo la dirección técnica del Dr. Josep Amat, catedrático de la Universidad Politécnica de Cataluña y responsable de robótica del Centro de Investigación en Ingeniería Biomédica (CREB, por su sigla en inglés) y la dirección médica de especialistas de la Clínica Mayo, en Estados Unidos.

Está orientado hacia la cirugía laparoscópica mínimamente invasiva y ha finalizado con éxito la validación técnica con modelos experimentales y se prepara para obtener la homologación europea y entrar en el mercado de cara en 2019. Bitrack es la alternativa modular, flexible y más económica del robot Da Vinci instalado en numerosos centros hospitalarios de referencia en todo el mundo como el Hospital Clínic y el Hospital Universitario Vall d'Hebron en Barcelona [13].

El reto global de la cirugía robótica es mejorar la eficiencia, es decir, que sin renunciar a la eficacia de los sistemas actuales se puedan adquirir robots a menor coste y que resuelvan algunos requerimientos técnicos que pide la comunidad médica.

5. CONCLUSIONES

Los robots no se han diseñado para sustituir a los profesionales humanos si no para ayudarlos en su trabajo, y en este caso, también para ayudar a los pacientes a los que tratan. En un futuro, estos robots no serán simples máquinas manejadas por cirujanos, también incorporarán una base de IA (Inteligencia Artificial) para así facilitar un mayor número de datos en tiempo real sobre la cirugía en cuestión, y no sólo de los datos del paciente anteriores a la cirugía. Además, podrán disfrutar de dicha tecnología la mayoría de hospitales y no sólo los de mayor prestigio.

REFERENCIAS

[1] C. Martínez-Ramos, Cirugía robótica (I): origen y evolución, http://www.asecma.org/Documentos/Articulos/AE%201_3.pdf

- [2] R. Valeroa, Y.H. Ko, S. Chauhan, O. Schatloff, A. Sivaraman, R.F. Coelho, F. Ortega, K.J. Palmer, R. Sanchez-Salas, H. Davila, X. Cathelineau y V.R. Patel, Actas Urológicas Españolas, Cirugía robótica: Historia e impacto en la enseñanza, <http://scielo.isciii.es/pdf/ae/v35n9/original5.pdf>
- [3] Real Academia Española, <https://dle.rae.es/?id=WYRIhzm>
- [4] Biografías y Vidas, <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/a/asimov.htm>
- [5] Revista de la Facultad de Medicina versión impresa ISSN 0798-0469, Jorge Ramón Lucena Olavarrieta, Paúl Coronel, Sabelén Orellana Pérez, Historia, evolución, estado actual y futuro de la cirugía robótica, http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0798046920070002002&script=sci_arttext
- [6] Robótica en la medicina, Xavier Cárdenas, <https://www.monografias.com/trabajos88/robotica-medicina/robotica-medicina.shtml>
- [7] David Rodríguez Carenas, Todo lo que debes saber sobre Da Vinci, el robot quirúrgico, <http://www.expansion.com/tecnologia/2017/04/15/58f24ada22601d67308b460b.html>
- [8] Clínica Centro, Cirugía Robótica Da Vinci, <http://www.icirugiariobotica.com/cirugia-robotica-da-vinci/>
- [9] Campus Sanofi, Los hospitales españoles apuestan por el robot Da Vinci, <https://campussanofi.es/2017/08/31/los-hospitales-espanoles-apuestan-por-el-robot-da-vinci/>
- [10] NancyCrotti, Olympus and FlexDex take aim at big, expensive robots, <https://www.medicaldesignandoutsourcing.com/olympus-and-flexdex-take-aim-at-big-expensive-robots/>
- [11] Europapress, Madrid incorpora seis nuevos robots Da Vinci para impulsar la cirugía robótica, <https://www.europapress.es/madrid/noticia-madrid-incorpora-seis-nuevos-robots-da-vinci-impulsar-cirugia-robotica-20181121163000.html>
- [12] Flexdex, la prolongación cuasi robótica de la mano del cirujano, https://www.consalud.es/saludigital/62/flexdex-la-prolongacion-cuasi-robotica-de-la-mano-del-cirujano_41509_102.html
- [13] elHospital, Españoles desarrollan una alternativa al robot quirúrgico Da Vinci, <http://www.elhospital.com/temas/Espanoles-desarrollan-una-alternativa-al-robot-quirurgico-Da-Vinci+123530>



Andrés Manuel Chacón Maldonado cursa actualmente segundo año de Ingeniería Informática en Sistemas de Información en la Universidad Pablo de Olavide.

Los videojuegos no fríen tu cerebro, lo entrenan.

Iván Morales Sevilla

Resumen—La cantidad de videojuegos que se crean hoy en día, nos puede llevar a pensar que crear, desarrollar, comercializar un videojuego es un proceso sencillo, al alcance de todo el mundo, nada más lejos de la realidad puede llegar a ser una tarea ardua y compleja.

Palabras Claves— Videojuego, Desarrollo, Idea, Pruebas, Producción, Comercialización.

1. INTRODUCCIÓN

¿Cómo empezar a crear?, ¿Cuáles son los pasos a seguir?, ¿Cuándo puedo empezar?. Bueno, poco a poco. Aquí te vamos a dar unas nociones básicas sobre cómo empezar y los pasos a seguir en el desarrollo y creación de videojuegos.

El desarrollo de videojuegos fue algo que comienza en 1947, a partir de Thomas T. Goldsmith Jr y Estle Ray Mann. Ellos fueron quienes inventaron el primer videojuego de arcade, basado en tubos de rayos catódicos. Se inspiraron en las pantallas de radar utilizadas en la segunda Guerra Mundial. [1]

Un videojuego (de su traducción del inglés video game, juego de video) tal y como lo entendemos hoy en día es un software (la parte que no se puede tocar del ordenador, siendo estas los programas, datos, etc.) [2] informático, creado para el entretenimiento.

Seguro que cuando estamos jugando a un videojuego, ya sea en un ordenador en una consola, en el móvil, nos hemos preguntado ¿cómo creamos un videojuego?

2. LA INDUSTRIA DEL VIDEOJUEGO.

Hoy en día el mercado del videojuego está en auge, creciendo un 8,5% en el año 2016 en comparación con el año 2015, alcanzando unos beneficios de 92.000 millones de euros según los datos de newzoo [3].

Entre los países mas importantes en Europa están: Alemania, Reino Unido, Francia, España e Italia. Durante 2016, Alemania registró unos ingresos de 3.700 millones de euros, Reino Unido unos 3.500 millones de euros, seguidos de Francia con 2.500 millones de euros.

Aunque en la cabeza están países como China, Estados Unidos, Japón y Corea del Sur

2.1 El Mercado a Nivel Global.

El crecimiento citado anteriormente se debe sobre todo al incremento del 10% en Asia y la zona del Pacífico, del 20% en Latinoamérica y del 26% en África y Oriente Medio.

2.2 Mercados Internacionales

La región que mayor aumento ha sufrido en 2016 ha sido África y Oriente Medio, con un ingreso de 2.950 millones de euros, un 26% más que 2015. Cabe destacar el ingreso de 695 millones de euros en Turquía y de 462 millones de euros en Arabia Saudí.

Buena parte del crecimiento global está relacionado con el aumento de la facturación en América Latina, donde se han registrado unos ingresos superiores a 3.775 millones de euros, un 20,1% más que en 2015. El mercado latino ha estado liderado por Brasil con una facturación de 1.195 millones de euros, México con 1.015 millones de euros y Argentina con 375 millones de euros.

La región de Asia y la zona del Pacífico ha seguido ocupando un año más la primera posición dentro del volumen de negocio mundial, superando los ingresos combinados de Norteamérica y Europa, alcanzando un 46,8% de la facturación total. Especialmente la facturación de China. Un 58% del crecimiento del mercado de videojuegos en 2016 ha procedido directamente de Asia. [4]

2.3 Crecimiento por Segmentos

De la facturación total de 91.700 millones de euros en 2016 en todo el mundo, el 29% fue de videoconsolas físicas y videojuegos, alcanzando 26.685 millones de euros (un 4,5% más que en 2015). Por otro lado, los videojuegos en móviles supusieron un 27% de los ingresos globales (23,7% más que en 2015), el mismo porcentaje que los videojuegos online. (4,2% más que el año pasado). Véase Fig1.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	CAGR 16-21
Videojuegos											
■ Publicidad en videojuegos											
Total publicidad en videojuegos	26	27	28	31	33	35	37	39	42	46	7,1%
■ Consumo de videojuegos											
- Juegos casuales/sociales											
Apps	184	196	208	221	235	249	263	278	293	309	5,6%
Juegos de navegador	46	48	49	48	48	48	47	47	46	46	-0,8%
Total juegos casuales/sociales	230	244	257	270	283	296	310	325	340	355	4,7%
- Juegos tradicionales											
Juegos de consola											
Juegos digitales de consola	44	52	60	70	81	91	101	111	120	131	10,1%
Juegos físicos de consola	397	381	346	337	336	334	330	325	319	312	-1,4%
Juegos online / microtransacciones de consola	9	13	26	32	38	44	50	56	62	68	12,4%
Total juegos de consola	449	445	432	438	455	469	482	493	502	512	2,4%
Juegos de PC											
Juegos digitales de PC	15	16	18	19	20	20	21	20	20	19	-0,5%
Juegos físicos de PC	30	20	18	15	15	14	14	13	13	13	-3,5%
Juegos online / microtransacciones de PC	89	75	81	85	89	93	97	101	105	110	4,4%
Total juegos de PC	114	111	116	119	123	127	131	135	138	142	2,5%
Total juegos tradicionales	563	556	548	557	578	596	619	627	640	654	2,5%
eSports	0	0	1	1	3	5	6	8	10	12	32,5%
Total consumo de videojuegos	793	801	805	826	861	893	929	952	979	1.008	3,2%
Total Videojuegos	819	828	835	859	897	932	967	1.000	1.032	1.067	3,5%

Fig 1. Crecimiento por Segmentos [5]

3. FASES A SEGUIR.

Véase Fig 2. Para tener un esquema visual de las fases en la creación y desarrollo de un videojuego.

3.1. La IDEA.

Al principio se empieza con una buena idea, sobre de qué va a tratar nuestro videojuego, que queremos transmitir, que tipo de juego vamos a llevar a cabo. En contadas ocasiones se tiene todo planificado en la cabeza desde el principio. Ese proceso puede ser:

1. Se determina el género o géneros del videojuego.
2. Proceso del juego.
3. Guión gráfico del juego.
4. Estilo de los personajes.
5. Música.
6. El Ambiente.

Antes de ponernos manos a la obra, sería conveniente evaluar el mercado para ver qué tipo de juego está 'de moda'. Por último, antes de pasar al diseño hacer también una evaluación técnica de nuestros recursos y con qué tipo de plataforma vamos a comercializar, si para móvil, PC, etc.

Una vez que se tienen todos estos conceptos aclarados y organizados. Podremos empezar con el proceso de diseño de nuestro videojuego.

3.2. Fase de Diseño

Esta fase es uno de los pasos que empezamos a hacernos un poco más a nuestra 'creación'. En el diseño se crea el **Documento de Diseño (GDD)**, [6] siendo un documento que alberga información para ayudar a artistas y programadores en sus tareas para crear el juego.

En este documento podemos encontrar información como:

- a. El desarrollo de la historia.
- b. Un modelo del guión.
- c. Cuales van a ser los personajes principales.
- d. El escenario

En este documento tienen que intervenir tanto los programadores, artistas gráficos, músicos, etc. Este documento

viene a ser una imagen de nuestro videojuego, una vez terminado. Con esta idea más clara encaminada de nuestro videojuego se empezará con el diseño (la manera en la que se implementará el videojuego, el lenguaje de programación, las metodologías usadas, etc.)

3.2. Fase de Planificación.

En esta fase se llevan a cabo el reparto de tareas entre todos los integrantes del proyecto, se fijan plazos para la ejecución de las tareas, plazos para las entregas y las reuniones claves con ayudas de herramientas como el PERT.

Esto puede acarrear el problema de los 'imprevistos' que hará que ralentice nuestra creación del videojuego, o incluso volver a la fase del documento de diseño y cambiar algunas medidas.

3.3. Fase de Producción.

Esta fase tiene como primordial función, el llevar a cabo las tareas descritas en el documento de diseño. Por lo que, una vez se tenga claro que hay que hacer, cómo hacerlo, y qué tiempo tenemos para hacerlo, se empieza a crear un prototipo de videojuego que podrá ser mejorado más adelante. Por tanto, incluye la codificación del programa en el lenguaje que hayamos acordado, la grabación de sonidos, la incorporación de la música, el desarrollo de interfaces, animación, el dibujo de los personajes, etc.

Si esta fase termina con éxito (aunque es realmente difícil ya que estamos trabajando con muchos factores y personas diferentes), se entraría en una fase para probar el videojuego a fondo y ver que efectivamente hemos cumplido temporalmente esta fase del desarrollo de videojuegos. [7]

3.4. Fase de Prueba.

Esta fase es una de las más importantes en el desarrollo de nuestro videojuego, ya que es la que muestra de verdad como hemos ido haciendo nuestro proyecto. En esta fase se llevan a cabo la corrección de errores, sobre todo, del proceso de programación y se mejora la jugabilidad, es decir, una de las características fundamentales de todos los videojuegos, la de producir diversión de manera interactiva, a medida que se va probando el juego. En cuanto a las pruebas hay dos tipos de pruebas especialmente importantes a la hora de probar un juego y son:

- **Pruebas Alpha:** Son pruebas que se llevan a cabo por un grupo pequeño de personas, involucradas en el desarrollo del videojuego, pudiendo albergar tanto a programadores, artistas, etc. Su función es corregir defectos graves y mejorar características de jugabilidad no contempladas en el

documento de diseño (como los Early Access, un acceso anticipado al juego para probarlo)

- **Pruebas Beta:** Este tipo de pruebas a diferencia de las Alpha se llevan a cabo por un equipo externo de jugadores, pudiendo ser contratados para probar el juego o sean un grupo componente del proyecto (grupo QA [8], es una red de profesionales cuyo objetivo principal es debatir y compartir el conocimiento sobre herramientas de automatización, metodologías, procesos y modelos de desarrollo). De estas pruebas el videojuego debe salir con la menor cantidad posible de defectos menores y ningún defecto medio o crítico. [9]

3.5 Fase de Distribución y Marketing

Después de haber pasado por la fase de pruebas y asegurarnos que nuestro videojuego funciona correctamente, después de haber aplicado los cambios realizados por el feedback en las pruebas Alpha y Beta, nos queda 'dar a conocer nuestro videojuego' dependiendo de su difusión ya sea para móvil (publicándolo en distintas tiendas virtuales), para consolas (a través de publicidad en la televisión), etc.

En el proceso de distribución se crean las diferentes copias de nuestro videojuego ya acabado para transportarlo a las distintas tiendas para su posterior venta.

El marketing es también una de las piezas fundamentales en el desarrollo, es el que nos comunica nuestro juego con el mayor número de jugadores posibles para que compren nuestro videojuego. Este proceso "El Marketing", no tiene un lugar estático a la hora de crear un videojuego, puesto que, hay empresas que hacen su campaña de marketing meses o incluso años antes de crear el producto por el simple hecho de atraer a clientes. Esto depende de los recursos de nuestra empresa, si bien la cadena de distribución y de marketing pueden estar presentes en nuestra empresa o, también cabe la posibilidad de delegar en otras empresas líderes en estas áreas.

Un concepto que cabe destacar es el de "hype", ocurre cuando una empresa hace uso de una excesiva publicidad para dar a conocer su producto, creando incluso una necesidad inexistente en los consumidores. Lo malo ocurre cuando el producto no está a la altura de lo prometido y entonces se convierte en el centro de críticas en muy poco tiempo, algo que puede perjudicar gravemente la imagen de los creadores y de la empresa hacia la venta de futuros videojuegos. [10]

3.6 Fase de Mantenimiento.

Pese a que nuestro videojuego esté finalizado y en las manos de los jugadores, su ciclo de vida aún está lejos de terminar. La fase de mantenimiento es el momento de arreglar nuevos errores, mejorarlo, etc. Ésto se hace sacando parches, es decir, cambios que se aplican a un programa, para corregir errores, agregarle funcionalidad, actualizarlo, etc. o actualizaciones al mercado.

Sin embargo, es también una oportunidad para seguir

sacándole partido. Ya sea en forma de microtransacciones, suscripciones de pago o incluso con expansiones completas que añaden nuevas características al videojuego sin modificar en profundidad el motor de este, digamos que sería más o menos como aprovechar al máximo la base inicial. [11]

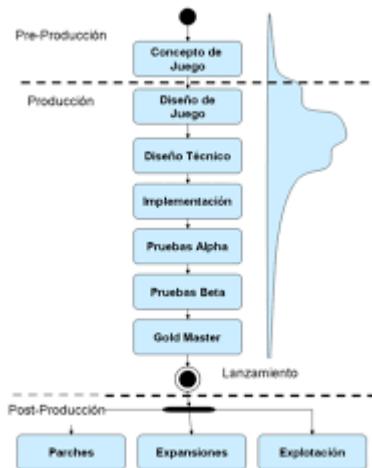


Fig 2. El proceso productivo del videojuego

4. EL DEBATE DE LOS VIDEOJUEGOS EN LA ACTUALIDAD

Esto es un debate que nunca acaba en nuestra sociedad hoy en día. Con argumentos como:

- Son malos para la vista.
- Te distraen de las cosas importantes de la vida
- Te hacen sentir más agresivo
- Te hacen convertirte en una persona antisocial

4.1. Los videojuegos hacen crecer tu cerebro y previenen la demencia

Se hizo un estudio en el que un equipo de neurólogos alemanes estudiaron a 23 personas jugando a Super Mario 64 media hora al día durante dos meses. Al final del estudio se les sometió a escáneres de resonancia magnética y revelaron que la materia gris había aumentado en el hipocampo, el córtex prefrontal, y el cerebelo, que son las partes del cerebro responsables de la percepción espacial, la memoria, la estratégica y la coordinación motora en las manos. Esto convierte a los videojuegos en una 'posible terapia' para los pacientes con enfermedades neurodegenerativas, que precisamente hacen que se encojan esas partes del cerebro, tales como la esquizofrenia, el estrés postraumático y el Alzheimer.

4.2. Los videojuegos aumentan la inteligencia

En un estudio de la Universidad de Londres se examinó los resultados de pruebas psicológicas de personas que habían jugado a videojuegos de estrategia Starcraft o los Sims. El resultado fue que aumentó su **flexibilidad cognitiva**, que es la capacidad del cerebro de adaptarse a los cambios, y a la base de la inteligencia. Los investigadores

sugieren que estos juegos también pueden ayudar con el trastorno de atención o hiperactividad, y ayudar a corregir en cierto modo las **lesiones cerebrales**.

4.3. Los videojuegos te mantienen joven.

Se hizo un estudio en el que los investigadores de la universidad de Iowa (Estados Unidos) comprobaron que los voluntarios de más de 50 años que jugaban durante al menos 10 horas al mes a un videojuego en el que tenían que conducir un coche vieron como se detenía la bajada de sus **habilidades cognitivas**, haciendo que su cerebro rejuveneciera hasta siete años.

4.4. Los videojuegos mejoran la vista.

Los videojuegos de acción en realidad hacen que tu visión pueda mejorar. En un estudio de 2009 de la universidad de Rochester (Nueva York) se comparó a voluntarios que jugaban a **Call of Duty** con otros que jugaban a los Sims 2. El grupo que jugaba al primer juego experimentó un aumento en la sensibilidad al contraste de sus ojos, o la capacidad de distinguir cambios en la luminosidad de una imagen.

4.5. Los videojuegos no te hacen violento.

La psicología ha expuesto en numerosas ocasiones que la exposición a la violencia en los videojuegos como Grand Theft Auto producen una desensibilización, una pérdida de la capacidad de empatizar con el sufrimiento humano, y por tanto son fábricas de psicópatas como los adolescentes en EE. UU. Ya que como he comentado al principio de este artículo es unos de los países cumbre en la comercialización de videojuegos al igual que Japón.

En un estudio con 90 jóvenes se les hizo jugar por grupos a GTA, o a los Sims, y después se les introdujo en un escáner de resonancia magnética para medir su nivel de empatía presentándoles imágenes de alguien que se hacía daño en la mano. La reacción ante el dolor ajeno fue la misma en todos los grupos. [12]

5. CONCLUSIONES

Este estudio muestra la creación en el desarrollo de videojuegos desde la importancia que van teniendo cada vez más los videojuegos en el día a día de nuestro país y en el mundo, hasta las creencias y mitos que se han contemplado con respecto a los videojuegos desde que se dieron a la luz en 1947. Como hemos visto en diversos estudios son más que eso, mitos o leyendas urbanas. Cada vez más todo se está automatizando y la forma de jugar también.

Teorema 1. *si estás planteando desarrollar un videojuego y vivir de ello, ¡no te olvides de pasar por todas las fases! Márcate objetivos y no tengas prisa por lanzar un pro-*

ducto sin pulir.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a:

- Anna Fabrés. Programadora y Artista 3D en Inverge Studios

REFERENCIAS

- [1] <https://descubrirahistoria.es/2014/01/el-primer-videojuego-de-la-historia/> (Autobiografía de Thomas T. Goldsmith Jr y Estle Ray Mann, creadores del primer videojuego en 1947)
- [2] https://es.slideshare.net/Indiana_1969/sistemas-operativos-e-informatica-para-nios (Explicación de concepto software)
- [3] <https://newzoo.com/> (Líder mundial en juegos y análisis de deportes, estudio que hizo sobre la evolución del videojuego comparando el año 2015 con el año 2016)
- [4] <https://www.pwc.es/es/sala-prensa/notas-prensa/2017/mercado-de-videojuegos-crecera-hasta-2021.html> (El mercado de videojuegos en España crecerá un 3.5% hasta 2021)
- [5] <http://www.aevi.org.es/la-industria-del-videojuego/en-el-mundo/W.-K.> (Referencia sobre los datos de crecimiento)
- [6] <http://www.fsgamer.com/como-se-crea-un-videojuego-20150507.html> (Documento de Diseño GDD)
- [7] https://revistas.ucm.es/index.php/HICS/article/viewFile/45178/4_2539 (Revista)
- [8] <https://www.meetup.com/es-ES/MADQA-Grupo-Meetup-de-QA-y-TESTING-de-SOFTWARE-en-Madrid/> (Explicación sobre el grupo QA)
- [9] https://www.ecured.cu/Desarrollo_de_Videojuegos
- [10] <https://docs.hektorprofe.net/escueladevideojuegos/articulos/fases-del-desarrollo-de-videojuegos/>
- [11] https://www.invergestudios.com/blog/fases_desarrollo_videojuegos/
- [12] https://www.eldiario.es/tumejoryo/estar_bien/videojuegos-frien-cerebra-entrenan_0_757675252.html (eldiario.es, periódico sobre la información de los estudios realizados en los videojuegos)



Iván Morales Sevilla Actualmente estudiante de 2º curso de Ingeniería en Sistemas de Información (GIISI) en la Universidad Pablo de Olavide, Sevilla.

GAS RADÓN Y CÁNCER DE PULMÓN

Autora: Laura Ventura San Pedro.

Resumen: el propósito de este artículo es describir las características químicas del gas radón y las implicaciones de las mismas en el desarrollo de cáncer de pulmón, basadas en diversas investigaciones realizadas.

Palabras clave: radón, exposición, cáncer, mutaciones.

Introducción

El radón es un gas noble de número atómico 86. Este elemento es gaseoso y radiactivo y se produce como consecuencia del decaimiento radiactivo del uranio, del torio y del radio. Estos elementos están mayoritariamente en el suelo y el radón, al producirse, puede alcanzar la superficie, desde donde pasa al aire [1].

Todos los isótopos de radón son radiactivos. El isótopo 222 del radón tiene una vida media de 3,8 días. Cuando tiene lugar su decaimiento radiactivo emite su progenie. Las partículas que forman parte de la progenie son radiactivas y no son gaseosas, pudiendo ser inhaladas, ya que se transportan fácilmente por el aire.

Cuando estas partículas, a través del aire, llegan al tejido pulmonar, siguen emitiendo radiación hasta que su progenie no es radiactiva. La radiación daña al ADN [2], originando mutaciones que pueden desembocar en cáncer.

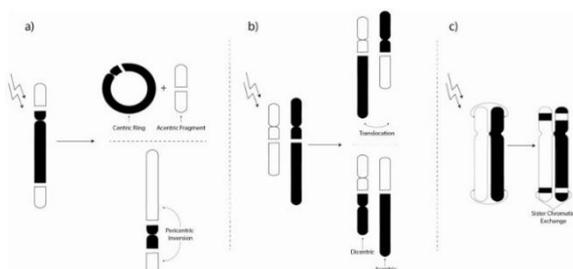


Fig. 1. Ejemplos de mutaciones susceptibles de ser originadas por exposición a radón [3].

- Mutación en un cromosoma.
- Mutación producida por una translocación entre dos cromosomas.
- Intercambio de fragmentos entre dos cromosomas.

De hecho, el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco en fumadores y la primera causa en no fumadores [4].

La Organización Mundial de la salud ha establecido el límite de exposición recomendada al radón en $100\text{Bq}/\text{m}^3$. Un Bq (Bequerel) es la unidad de desintegración radiactiva, que indica la desintegración de un núcleo por segundo. Por lo tanto, la concentración se mide en Bq/m^3 .

Método

Varios estudios llevados a cabo han recopilado información de la cantidad de radón presente en distintas zonas y la incidencia de cáncer en dichas zonas. Concretamente, se muestran tres estudios, uno sobre radón residencial y dos sobre los efectos del radón en mineros.

En primer lugar, un estudio iniciado en enero de 2011 (Lung Cancer Risk in Never Smokers (LCRINS)) recopiló datos de diez hospitales de tres comunidades autónomas de España: Galicia, Madrid y Asturias [5]. Esta investigación pretendía conocer los factores de riesgo del cáncer de pulmón.

Por otro lado, un estudio realizado en Alemania sobre mineros de la empresa Wismut fue llevado a cabo con 26766 mineros para ver la influencia de la exposición a radón a una muerte de cáncer de pulmón. Se tuvieron en cuenta las muertes acontecidas entre 1960 y 2008 entre trabajadores contratados desde 1960.

La exposición a radón se midió en meses de nivel de trabajo (WLM, working level months) y se tuvo en cuenta el estado de consumo de tabaco de cada individuo y la duración del empleo, realizando así una clasificación.

Otro estudio se realizó en Francia, en el cual se pretendía cuantificar el riesgo de padecer cáncer de pulmón debido al radón. Para ello, se tomaron 500 controles y 100 mineros de la

compañía CEA-COGEMA (“Commissariat à l’Energie Atomique–Compagnie Générale des Matières Nucléaires”) que murieron de dicha enfermedad. Se recopiló información acerca del nacimiento de cada individuo, así como de la duración, tanto del empleo en la compañía como de la exposición a radón. Esta última se midió en WLM y se realizó un cálculo para obtener el cúmulo de la radiación a la que estuvo expuesto cada individuo. Además, se tuvo en cuenta el consumo o no de tabaco.

Resultados

El primer estudio mostró 400 casos de cáncer de pulmón en no fumadores, mayoritariamente por exposición a radón residencial. También centró su atención en diferentes mutaciones originadas.

En lo que a mutaciones se refiere, se ha comprobado que aquellos pacientes que han sido expuestos a una mayor concentración de radón presentan en mayor frecuencia la delección del exón 19, la translocación de ALK y modulación de la expresión de GSTM1 y GSTT1, aunque aún no se sabe con seguridad.

La investigación sobre mineros alemanes extrajo los siguientes datos:

Tabla 1

Características de los mineros alemanes [6]

Miñeros, <i>n</i>	26 766
Muertes por cáncer de pulmón, <i>n</i>	334
Estado de fumador, <i>n</i> (%)	
No fumador	3533 (13.2)
Ligero	2831 (10.6)
Moderado/fuerte	8702 (32.5)
Unknown	11 700 (43.7)

Exposición acumulada a:

Radón en WLM	17 (>0–334)
Radiación gamma externa, en mSv	30 (>0–480)
Radionúclidos de larga duración en kBq h m ⁻³	0.8 (>0–30)
Exposición individual media al radón en WL, mean (range)	0.2 (>0–3.9)

A partir de esta información, se calculó el riesgo relativo de muerte por cáncer de pulmón, así como la relación entre la exposición al radón y el riesgo relativo de muerte por cáncer de pulmón (Fig. 2).

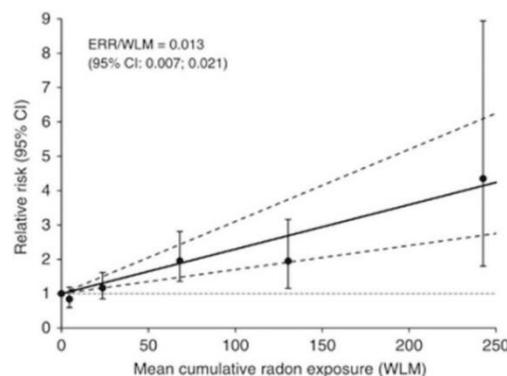


Fig. 2. Relación entre el riesgo de muerte por cáncer y la exposición al radón. *WLM (working level months) [6].

Por último, el estudio realizado sobre mineros franceses obtuvo datos clasificados de manera similar, obteniendo, mostrando la acumulación de exposición a radón en los individuos (Fig. 3), así como la relación entre esta exposición y el riesgo relativo de muerte por cáncer de pulmón (Fig. 4).

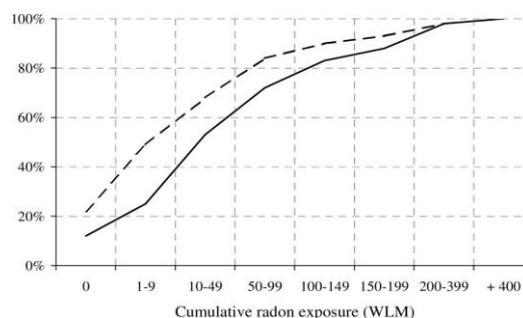


Fig. 3. Distribución de la exposición a radón entre controles (línea discontinua) y casos (línea continua). [7].

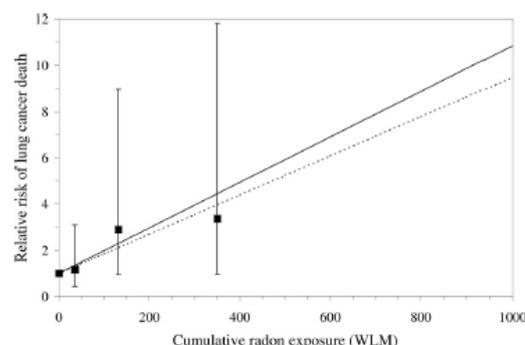


Fig. 4. Relación entre riesgo relativo de muerte por cáncer de pulmón y la exposición a radón. ■=relación entre riesgo relativo y el 95% de intervalo de fiabilidad; línea discontinua=riesgo relativo multiplicado por un factor indicativo de consumo de tabaco; línea continua=riesgo relativo [7].

Discusión

Los datos expuestos por las distintas investigaciones dan lugar a un resultado común: el radón aumenta las posibilidades de padecer cáncer en gran medida.

En cuanto al primer estudio, que es el basado en radón residencial, cabe destacar que, en España, las zonas que presentan mayor concentración de este gas debido a las características del suelo son Galicia, Madrid, Castilla-León y Extremadura, lo que explica los resultados obtenidos.



Fig. 5. Mapa de concentraciones de radón en España [8]. En rojo oscuro, las zonas con mayor concentración de radón.

El radón residencial ha de ser combatido con distintas medidas. Este gas sale por el suelo hasta la superficie, por lo que las opciones más recomendadas son la ventilación de la vivienda, el sellamiento de la misma, un sistema de extracción del gas, la despresurización del espacio entre el suelo y el edificio para reducir todo lo posible la entrada del gas y el recubrimiento de aquellos elementos que presenten gran cantidad de radón [9].

En lo referente a las dos investigaciones basadas en mineros, vemos que, a mayor duración del trabajo, más radiación acumulada y, por tanto, mayor probabilidad de desarrollar la enfermedad.

Conclusiones

Los datos expuestos ponen de manifiesto el importante papel que posee en radón en el origen del cáncer de pulmón. Es por ello que constituye un grave peligro y se han de tomar

medidas a la hora de la construcción de los edificios y de informar a la población.

Referencias

- [1] "Radon Basics | National Radon Program Services." [Online]. Available: <http://sosradon.org/Radon Basics>. [Accessed: 22-Dec-2018].
- [2] J. A. Garcia-Rodriguez, "Radon gas—the hidden killer," *Can Fam Physician*, vol. 64, pp. 496–501, 2018. 2018.
- [3] A. Robertson, J. Allen, R. Laney, and A. Curnow, *The cellular and molecular carcinogenic effects of radon exposure: A review. International Journal of Molecular Sciences*. vol. 14, no. 7. 2013.
- [4] J. R. Choi, S. B. Koh, H. R. Kim, H. Lee, and D. R. Kang, "Radon Exposure-induced Genetic Variations in Lung Cancers among Never Smokers.," *J. Korean Med. Sci.*, vol. 33, no. 29, p. e207, 2018.
- [5] A. Ruano-Ravina, A. Fernández-Villar, and J. M. Barros-Dios, "Residential Radon and Risk of Lung Cancer in Never-Smokers," *Arch. Bronconeumol.*, vol. 53, no. 9, pp. 475–476, 2017.
- [6] M. Kreuzer, N. Fenske, M. Schnelzer, and L. Walsh, "Lung cancer risk at low radon exposure rates in German uranium miners," *Br. J. Cancer*, vol. 113, no. 9, pp. 1367–1369, 2015.
- [7] K. Leuraud *et al.*, "Lung cancer risk associated to exposure to radon and smoking in a case-control study of French uranium miners," *Health Phys.*, vol. 92, no. 4, pp. 371–378, 2007.
- [8] "Mapa del potencial de radón en España - CSN." [Online]. Available: <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>. [Accessed: 22-Dec-2018].
- [9] INSHT, "(NTP 440) Radón en ambientes interiores," *INSHT-Instituto Nac. Segur. e Hig. en el Trab. Minist. Trab. y Asuntos Soc.*, p. 7, 1999.

Biografía

Laura Ventura San Pedro, estudiante de primer curso de Biotecnología.

Ammonia synthesis and its utility

Nieves Ossorio Muñoz

Summary—Ammonia can be regarded as one of the most important compounds in the evolution of humanity during the past century. Since Haber discovered how to synthesise it, it has been used for numerous purposes. The aim of this article is to give an overview of the influence of ammonia synthesis, as well as to analyse some thermodynamic aspects related to the reaction that takes place.

Key words—Ammonia, Catalyst, Chemical warfare, Haber-Bosch process, Pollution.



1. INTRODUCTION

The air that surrounds us contains about 80% N_2 , which is a highly stable and relatively inert molecule, due to the triple bond that joins both atoms. It was not until the beginning of the last century when a process was developed to obtain nitrogen from air and to produce ammonia, which can be oxidised to nitrites and nitrates.

Ammonia was first synthesised by F. Haber in 1908. Some years later, in 1913, K. Bosch designed and developed the first factory required to synthesise this compound in large amounts. For their success in overcoming the problems derived from working with large-scale, continuous-flow, high-pressure technology, both scientists were awarded the Nobel Prize in Chemistry in 1918 and 1931, respectively [1].

Some scientists regard the so-called Haber-Bosch process as the most important technical development of the 20th century [2] as it "detonated the population explosion" that began in 1900. Some other researchers believe that Haber and Bosch's impact on our planet is greater than anyone else's impact in the past century, including Hitler, Gandhi, Einstein, etc. [3]. However, the discovery of ammonia synthesis also led to the chemical warfare during World War I and to the invention of Zyklon B poison gas, used in the World War II's Holocaust.

Nowadays, the process is still used to produce more than 500 million tons of artificial fertiliser per year. 1% of the world's energy supply is used for it [4]. At the

beginning of this century, it still sustained roughly 40% of the population. Without ammonia synthesis reaction, farmers would be capable of producing food for about 4 billion people. "Our current population is just over 7 billion people. How do we grow crops quickly enough to feed the Earth's billions? It is called the Haber process, which turns the nitrogen in the air into ammonia, easily converted in soil to the nitrate plants need to survive" [3]. This explains the population explosion experienced in the 20th century.

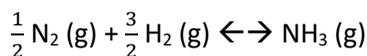
Ammonia is an essential compound in contemporary society, as it is indispensable in the production of dyes, plastic materials, fertilisers, nitric acid, cleaning products (as cryogenic gas), explosives and synthetic fibres (such as nylon), among a large list of products.

2. ENVIRONMENTAL IMPACT

Although food supply has been increased worldwide thanks to the production of fertilisers, the Haber process has taken a toll on the environment, as only 17% of ammonia used as fertiliser is consumed by humans through food. The rest of the compound ends up in soil or air. For that reason, the global nitrogen cycle has been altered remarkably. Two considerable problems are derived from ammonia synthesis. The first one is the eutrophication of water: nitrates end up in seas and rivers, where algae and bacteria have a feast thanks to the excess of nutrients. For that reason, oxygen is used up and other species aren't able to survive. The second problem is related with reactive nitrogen, which alters the atmospheric balance, increasing the concentration of ozone in the troposphere and decreasing it in the stratosphere [4].

3. THERMODYNAMIC ASPECTS OF AMMONIA SYNTHESIS

The process required to synthesise ammonia takes place in an equilibrium in gaseous phase:



The following table shows some thermodynamic data related with the species involved in the equilibrium:

Substance	ΔH_f° (kJ / mol)	S° (J / (mol·K))
H ₂ (g)	0	+ 131
N ₂ (g)	0	+ 192
NH ₃ (g)	-46	+ 193

When F. Haber received the Nobel Prize, during his speech, he gave the following data about the equilibrium mentioned previously:

T (°C)	K _p	K _c	Molar fraction of NH ₃ in the equilibrium			
			1 atm	30 atm	100 atm	200 atm
200	0.66	26	0.15	0.68	0.81	0.86
400	0.014	0.76	4.4·10 ⁻³	0.11	0.25	0.36
600	1.5·10 ⁻³	0.11	4.9·10 ⁻⁴	0.014	0.045	0.083
800	3.6·10 ⁻⁴	0.032	1.2·10 ⁻⁴	3.5·10 ⁻³	0.012	0.022
1000	1.4·10 ⁻⁴	0.014	4.4·10 ⁻⁵	1.3·10 ⁻³	4.4·10 ⁻³	8.7·10 ⁻³

The process takes place introducing nitrogen and oxygen in stoichiometric conditions in the reactor, at 500°C and 200-700 atm. Furthermore, a catalyst should be used. Under these conditions, the conversion in a single step is very low, as we can conclude by observing the data in table 2. For that reason, the gases that get out of the reactor cool, condensing and

eliminating the ammonia that has been formed and reintroducing nitrogen and hydrogen inside the reactor.

Pressure and temperature conditions are not motivated by thermodynamics exclusively, but also by kinetics. That is why the catalyst is also specially prepared so that the contact surface is maximum.

For economic reasons, it is important to study the spontaneity of a given chemical process. We can determine the temperature interval in which the direct reaction of formation of ammonia is spontaneous from the data in table 1. As approximation, we assume that the thermodynamic magnitudes involved do not vary with temperature.

First of all, we have to calculate the value of ΔG_R° (Gibbs free energy) by using the following formula:

$$\Delta G_R^\circ = \Delta H_R^\circ - T\Delta S_R^\circ. \quad (1)$$

Enthalpy variation is calculated by means of the molar enthalpies of products and reactants (that is, applying Hess's Law):

$$\Delta H_R^\circ = \sum [v_i H_i^\circ]_{\text{products}} - \sum [v_i H_i^\circ]_{\text{reactants}}. \quad (2)$$

Thus,

$$\Delta H_R^\circ = \left[1 \text{ mol NH}_3 \frac{-46 \text{ kJ}}{\text{mol NH}_3} \right] - \left[\frac{1}{2} \text{ mol N}_2 \frac{0 \text{ kJ}}{\text{mol N}_2} + \frac{3}{2} \text{ mol H}_2 \frac{0 \text{ kJ}}{\text{mol H}_2} \right] = -46 \text{ kJ} \text{ . (Exothermal)}$$

Entropy variation can also be calculated by means of the molar enthalpies of products and reactants (applying Hess's Law):

$$\Delta S_R^\circ = \sum [v_i S_i^\circ]_{\text{products}} - \sum [v_i S_i^\circ]_{\text{reactants}}. \quad (3)$$

$$\Delta S_R^0 = \left[1 \text{ mol NH}_3 \frac{193 \text{ J}}{\text{K} \cdot \text{mol NH}_3} \right] - \left[\frac{1}{2} \text{ mol N}_2 \frac{192 \text{ J}}{\text{K} \cdot \text{mol N}_2} + \frac{3}{2} \text{ mol H}_2 \frac{131 \text{ J}}{\text{K} \cdot \text{mol H}_2} \right] = -99.5 \text{ J/K}.$$

Then, solving for T in equation 1 (where $\Delta G_R^0 = 0$ in equilibrium), we get:

$$T = \left[\frac{-46 \text{ kJ}}{-99.5 \text{ J/K}} \cdot \frac{10^3 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \right] = 462 \text{ K}.$$

We can conclude that ammonia synthesis is a spontaneous process for $T < 462 \text{ K}$. For higher temperatures, $\Delta G_R^0 > 0$, which means that the process would require a supply of energy.

The use of a catalyst is required in ammonia synthesis for the activation energy to be lower and, therefore, for the equilibrium to be reached in less time.

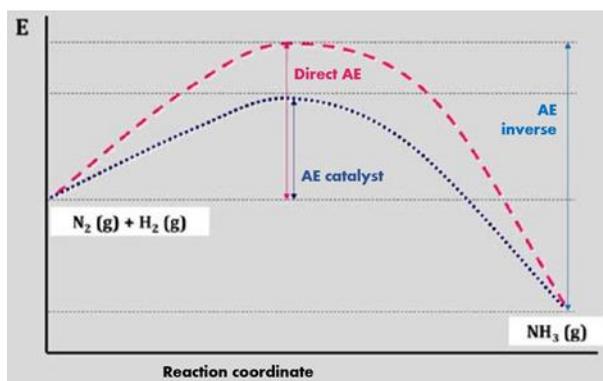


Fig. 1. Energetic diagram for catalysed and non-catalysed ammonia synthesis reactions.

As we can observe in figure 1, the activation energy of the non-catalysed reaction is higher than that of the catalysed reaction. The presence of the catalyst leads to a decrease in the activation energy of direct and inverse reactions. That is why the equilibrium is reached in less time.

To study the reaction that takes place, it is also very useful to represent the molar fraction of NH_3 in equilibrium versus temperature at different pressures and versus pressure at different temperatures.

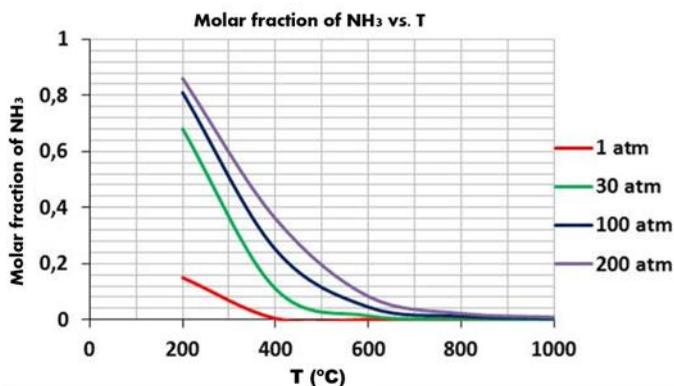


Fig. 2. Molar fraction of NH_3 versus temperature at different pressures.

From figure 2, we can conclude that, at constant pressure, an increase in temperature leads to a decrease in the amount of NH_3 that is produced. This is consistent with the fact that it is an exothermic process, which can be favoured by decreasing the temperature (according to Le Châtelier's Principle).

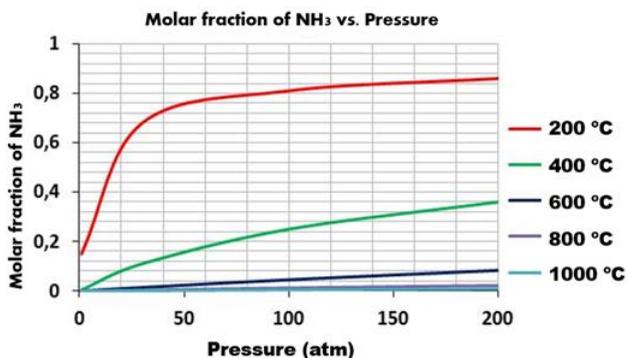


Fig. 3. Molar fraction of NH_3 versus pressure at different temperatures.

As we can see in figure 3, at constant temperature, an increase in pressure causes an increase in the amount of NH_3 produced, which is consistent with the fact that there are more gas moles in the reactants than in the products (in agreement with Le Châtelier's Principle).

Le Châtelier's Principle can help us predict how the equilibrium would be affected if we performed a change in a given variable that determines the

equilibrium state. Let us see some examples of this, applying the principle to ammonia synthesis:

- *Addition of a catalyst (in this case, iron):* It produces a decrease in activation energies of both direct and inverse reactions. Thus, the reaction is faster than without the catalyst, but the equilibrium is not altered. For that reason, the amount of NH_3 synthesised is constant.
- *Extraction of $\text{NH}_3(g)$ from the reactor:* The equilibrium would be shifted to the right in order to replenish NH_3 , so the yield of the process increases.

At $25\text{ }^\circ\text{C}$, the equilibrium constant (K_c) would have a value of $3.6 \cdot 10^8$, a high value, which means that, at equilibrium, almost all the reactants have been transformed into ammonia. However, the reaction is very slow at this temperature. For that reason, ammonia synthesis is usually developed at 200-700 atm and $500\text{ }^\circ\text{C}$, approximately.

4. INDUSTRIAL AMMONIA SYNTHESIS

As we said before, the reaction by which ammonia is produced is exothermic, so according to Le Châtelier's Principle, ammonia synthesis would be favoured by decreasing the temperature. However, this would also lead to a decrease in the velocity of the reaction and, as a consequence, we would require a lot of time to produce a small amount of ammonia.

Then, we have the following dilemma: if we increase temperature, the velocity is increased, but then we have high amounts of N_2 and H_2 and a low of NH_3 . On the other hand, if we decrease temperature, the velocity is very low. For that reason, the reaction is developed at rather high temperatures and a catalyst is used in order to further increase the velocity of the reaction. Usually, the catalyst is made up of Fe^{3+} and different oxides. However, even at these conditions, the reaction would not be favourable (from an industrial point of view), if the value of the pressure was not

200-700 atm. At this pressure interval, ammonia is separated from the mixture of gases as a liquid, being cooled by a refrigerating system. On the contrary, nitrogen and hydrogen can not be condensed, so the reactants that have not reacted return to the converter.

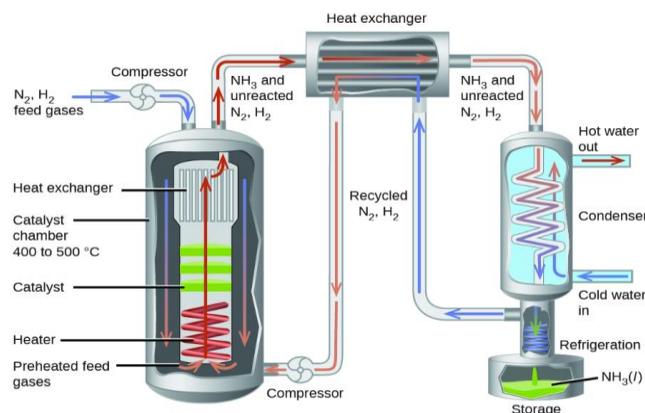


Fig. 4. Diagram of an ammonia production plant.

Figure 4 illustrates how the machinery to synthesise ammonia works. Gaseous nitrogen is obtained from the air and it crosses a compressor. The obtained nitrogen is mixed with gaseous hydrogen. The mix crosses a large tube filled with a porous catalytic mass, usually made of iron oxides and lower amounts of potassium and aluminium oxides.

5. CONCLUSION

The process of ammonia synthesis is a model reaction to understand the kinetic and thermodynamic factors that have an effect on the velocity of chemical reactions and the evolution of chemical equilibria. It also allows us to understand some thermodynamic concepts applied to a real situation.

Nowadays, ammonia is an essential compound in our society, as it is used to produce many everyday products, as dyes or plastic materials. Moreover, it has contributed to the development of our society, being responsible for the 20th century's population explosion, due to the utilisation of ammonia to produce fertilisers.

However, ammonia synthesis has also led to several environmental problems. For that reason, currently, scientists are trying to find “a new Haber process of the 21st century” with the same level of aid as ammonia synthesis has provided, but without its negative effects on the environment.

<https://opentextbc.ca/chemistry/chapter/13-3-shifting-equilibria-le-chateliers-principle/>



Nieves Ossorio Muñoz is an undergraduate in Biotechnology at Universidad Pablo de Olavide (Sevilla).

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank her Chemical Thermodynamics and Kinetics Professor, Juan Antonio Anta Montalvo, for providing her with some of the knowledge required to write this article during the first semester of 2018/2019 academic year.

REFERENCES

- [1] Hager, Thomas (2008). *The Alchemy of Air: A Jewish genius, a doomed tycoon, and the scientific discovery that fed the world but fueled the rise of Hitler* (1st ed.). New York, NY: Harmony Books.
- [2] V. Smil, *Nature*, 29 July 1999, page 415.
- [3] “HABER & BOSCH - Haber-Bosch process,” n.d.
<http://people.idsia.ch/~juergen/haberbosch.html>
- [4] *Science* 297, page 1654, September 2002.
- [5] Daniel D. Dulek’s talk in TED, 2013.
<http://socksonanoctopus.com/ted-talks-daniel-d-dulek-haber-process/#.XFq4FxKq2w>
- [6] Madri+d Noticias
<http://www.madrimasd.org/noticias/Amoniaco-sustancia-cambio-mundo/36547>

QuimiTube. Producción industrial del amoníaco: el Principio de Le Châtelier en acción.

<http://www.quimitube.com/produccion-industrial-amoniaco-sintesis-de-haber-principio-le-chatelier>

Figure 1. Extracted from “Problemas y cuestiones de las Olimpiadas de Química. Volumen 8: Problemas de Termoquímica, Cinética y Equilibrio Químico” (S. Menargues & F. Latre. November 2011) and modified.

Figure 2. Extracted from “Problemas y cuestiones de las Olimpiadas de Química. Volumen 8: Problemas de Termoquímica, Cinética y Equilibrio Químico” (S. Menargues & F. Latre. November 2011) and modified.

Figure 3. Extracted from “Problemas y cuestiones de las Olimpiadas de Química. Volumen 8: Problemas de Termoquímica, Cinética y Equilibrio Químico” (S. Menargues & F. Latre. November 2011) and modified.

Figure 4. Extracted from “BC Open Textbooks”:

Biocombustibles: tipos y estrategias de producción.

Maria Dolores Cortés-Sánchez, Esperanza Macarena Gata-Montero, Andrea Pipió-Ternero, Álvaro Rodríguez-Rivas y Juan Manuel Sánchez-Santos.

Resumen— Los biocombustibles son una fuente renovable de combustibles orgánicos cada vez más investigada y demandada. En el presente artículo se revisan diferentes estrategias para la producción de biocombustibles. Se describe principalmente la producción de bioetanol y de biodiésel a partir de diversas materias primas, así como su obtención mediante el uso de fluidos supercríticos. Las técnicas más usadas en la generación secundaria de biocombustibles son la torrefacción, licuación, pirólisis y gasificación. Además, se presentan resultados experimentales propios donde se puede observar la producción de biodiésel mediante transesterificación a partir de aceite de cocina usado.

Palabras Claves—biocombustibles, generación, segunda-generación, bioetanol, biodiésel.



1. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de los combustibles fósiles y su impacto ambiental motiva la búsqueda de nuevas alternativas para generar biocombustibles a partir de diversas materias primas renovables. Los principales biocombustibles se clasifican en dos tipos: de primera y segunda generación, aunque también existen de tercera y cuarta generación. Los de primera generación son los producidos a partir de aceites o azúcares comestibles que provienen de plantas como el maíz, girasol o caña de azúcar. Los biocombustibles de segunda generación se obtienen con materias primas no aprovechables para alimentación humana, como son los residuos agrícolas, forestales, los lodos de depuradora o el aceite usado de cocina. Los métodos se centran en la producción de bioetanol o biodiésel, y son los que explicaremos a continuación.

Producción de bioetanol

La producción de bioetanol se ha desarrollado históricamente conforme a la búsqueda de la materia prima adecuada para su producción, lo que ha llevado a la aparición de tres generaciones diferentes atendiendo al tipo de materia prima usada:

Primera generación: el maíz y la caña de azúcar se utilizan como materia prima para el bioetanol principalmente en los Estados Unidos y Brasil, mientras que el trigo y la remolacha azucarera se utilizan comúnmente en Europa. La desventaja principal del etanol de primera generación es que la utilización de recursos alimenticios como combustible puede amenazar el suministro de alimentos a gran parte de la población, mientras que, por otro lado, también podrían aumentar los precios de los alimentos. [1]

Segunda generación: se produce a partir de biomasa lignocelulósica, que incluye residuos forestales, residuos

agrícolas y desechos urbanos, como pueden ser los lodos de depuradoras, que explicaremos con más detenimiento más adelante. El componente principal de estos residuos es la celulosa, aunque también aparecen otros compuestos como la lignina y la hemicelulosa. La compleja estructura de la hemicelulosa determina que su hidrólisis requiera múltiples hemicelulasas que cooperen entre sí [1], [2].

Para la producción del bioetanol a partir de material lignocelulósico es necesario realizar, por tanto, un pretratamiento, cuyo objetivo es el de degradar las largas cadenas de polisacáridos en cadenas más cortas y sencillas para su posterior hidrólisis enzimática. Estos pretratamientos pueden ser:

- Mecánicos o físicos: trituración mecánica y ultrasonido.
- Térmico: explosión de vapor y agua líquida a alta temperatura (LHW).
- Fisicoquímicos: proceso de explosión de fibra con amoníaco (AFEX) y explosión con CO₂.
- Químicos: hidrólisis ácida, oxidación húmeda y tratamientos con ozono.
- Biológicos: tratamiento con hongos y tratamiento con bio-solventes orgánicos.

A estos pretratamientos le sigue la hidrólisis enzimática, que es un proceso catalizado por celulasas. Esta hidrólisis es llevada a cabo por diversos tipos de bacterias y hongos. Entre los organismos conocidos con mayor capacidad de hidrólisis de celulosa se encuentran *Caldicellulosiruptor bescii* y *Trichoderma reesei* [1], [2].

Tras la hidrólisis comienza el proceso de fermentación, el cual puede presentar dos problemas principales: la producción de diversas moléculas inhibitorias del crecimiento de los organismos fermentadores durante el pretratamiento y la liberación de xilosa, subproducto poco asimilable de la degradación de la hemicelulosa. *Saccharomyces cerevisiae* es el microorganismo que se suele utilizar para esta fase debido a su alta tolerancia a los inhibidores, su alta tasa de crecimiento y su capacidad para utilizar pentosas como la xilosa en la fermentación [1], [3].

Tercera generación: para superar las desventajas de las dos generaciones anteriores se planteó el uso de algas tanto micro como macroscópicas para la producción del bioetanol. Esto se debe a que las algas suponen una fuente renovable que posee diversas ventajas, entre las que destacan la rápida generación de biomasa en tiempos cortos y que su cultivo puede realizarse en tierras no destinadas al cultivo de vegetales comestibles. El proceso de obtención de bioetanol a partir de algas es similar al que se sigue en el caso de los residuos lignocelulósicos. Sin embargo, aquí el pretratamiento no es necesario, ya que su estructura es degradable directamente mediante una hidrólisis ácida para posteriormente realizar el proceso de fermentación mediante *Saccharomyces cerevisiae* [1], [4].

Biocombustibles de segunda generación

La segunda generación es actualmente la más estudiada. La ventaja de este proceso es que presenta una huella nula, incluso negativa, de CO₂. La materia prima más utilizada y en la que nos vamos a centrar es el residuo lignocelulósico procedente de la industria maderera y de la agricultura. Este residuo representa una de las fuentes biológicas más infrutilizadas e infravaloradas, y se ve como una fuente prometedora de biocombustibles.

El 75% de la biomasa vegetal se compone de polisacáridos. Hay un depósito de azúcares enorme que no se aprovecha dentro de la agricultura, ya que la fracción de azúcares que se aprovecha para la alimentación es ínfima en comparación con los polisacáridos que se presentan en la pared celular del resto de la planta, es decir, de las partes no comestibles. Desde el punto de vista más simple, esta materia puede quemarse para generar calor y electricidad.

Hay dos rutas principales para la obtención de biocombustibles líquidos a partir de biomasa: la primera involucra procesos termoquímicos, que presenta la ventaja de convertir prácticamente toda la materia en bioetanol. La segunda es la bioquímica. Como desventaja de esta última, hay que mencionar que solo puede convertir una fracción de los polisacáridos, siendo así el rendimiento muy bajo. Por tanto, vamos a centrarnos en los principales procesos termoquímicos [5].

Torrefacción

El concepto de torrefacción normalmente se interpreta como un asado o pirólisis leve. En este proceso se somete a la lignocelulosa a unas temperaturas de entre 230 y 300°C. Esto tiene como resultado una evaporación de agua y de compuestos volátiles, que permite un mejor aprovechamiento de la energía en los procesos posteriores; por esto también recibe el nombre de pretratamiento. Este proceso por sí solo obtiene un rendimiento muy bajo en la producción de biocombustibles [6].

Licucción

En este proceso se aplican temperaturas de entre 280°C y 370°C a altas presiones (4-22 MPa) en presencia de agua. No se conocen del todo los mecanismos responsables, pero se cree principalmente que los procesos de hidrólisis y descomposición de las moléculas son los que favorecen la producción de biocombustibles. En la hidrólisis las mo-

léculas se rompen en monómeros de azúcares sencillos gracias a las altas temperaturas, presión y presencia de agua. En la descomposición se pierden las moléculas de agua, provocando deshidratación, descarboxilaciones y la volatilización del grupo amino de algunas proteínas.

El problema principal de esta técnica es el ambiente oxidante que se genera. Así, se crean radicales libres que acaban polimerizando entre sí, creando una red extensa continua de carbono, que deriva en la formación de carbón. Para evitarlo, se emplean agentes reductores (donadores de hidrógeno), siendo los más usados son compuestos orgánicos. Se llegan a conseguir concentraciones aproximadamente del 50% de biocombustibles líquidos [6].

Pirólisis

La característica principal de este proceso es la ausencia de oxígeno. Normalmente se emplea a presión atmosférica y muy altas temperaturas (de 400°C a 700°C). Se subdivide en dos procesos: pirólisis rápida y pirólisis lenta. La lenta está enfocada a la producción de carbón a temperaturas un poco más bajas, por lo que no nos interesa. La rápida se centra en la producción de biocombustibles a más altas temperaturas y es de la que hablaremos a continuación.

El mecanismo de acción responsable es la descomposición radical, generando compuestos altamente reactivos ricos en oxígeno. Es por esta razón que los biocombustibles de primera línea producidos en esta técnica no puedan usarse como tal, ya que su poder calorífico es bajo. Primero deben sufrir un tratamiento con catalizadores oxidoreductores, como zeolitas o algunos basados en metales, que eliminen el oxígeno de los biocombustibles. Normalmente, estos procesos requieren de una fuente adicional de hidrógeno para su reducción. Lo más usual es el uso de compuestos orgánicos reductores [6].

Gasificación

Como su nombre indica, la gasificación convierte directamente la biomasa, pretratada o no, en syngas (término inglés proveniente de las siglas 'Synthesis gas', «Gas de síntesis»), que es un gas con unas concentraciones relativamente constantes de metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno. Hay varios tipos de gasificación, pero el más usado es el que emplea agua supercrítica. Normalmente ocurre a temperaturas de entre 700°C y 900°C a muy altas presiones.

La gasificación es una prolongación de los procesos anteriormente descritos, en el cual el carbón y el biocombustible generado se siguen degradando a moléculas más pequeñas, generando el syngas. La razón de obtener syngas es la utilización de éste para, posteriormente, sintetizar metanol mediante la reacción de síntesis de Fischer-Tropsch [6].

Producción de bioetanol a partir de lodos de depuradoras.

Debido a que el proceso de obtención a partir de materiales lignocelulósicos tiene un coste elevado por la necesidad de pretratar la materia prima, como hemos visto en los dos puntos anteriores, se plantea la búsqueda de nue-

vas materias primas. Éstas deben ser residuos abundantes, pero que no genere competencia con otros sectores. Es por ello que en algunos estudios se centran en la obtención de bioetanol a partir de lodos de depuradoras, que es un residuo continuo, con idea de proponer una bioeconomía circular. En concreto, los estudios se centran en determinar cuáles son las condiciones óptimas para la producción de bioetanol a partir de lodos de depuradora. Para el estudio de las condiciones óptimas, primero realizan un pretratamiento de los lodos, donde son secados, troceados en partículas de menos de 3 mm y posteriormente pasadas por un tamiz para asegurar la uniformidad del tamaño de las partículas. A continuación, los lodos son humedecidos con agua destilada hasta alcanzar un 40% en humedad y a un proceso de autoclave para eliminar cualquier microorganismo presente. Posteriormente, se inoculan 3 ml de *Bacillus flexus*. La incubación con dicho microorganismo durará 48h a 30°C. Esto es así para que se produzca la sacarificación, algo totalmente necesario para la posterior fermentación con *S. cerevisiae*. Al hidrolizado que se obtiene después de la incubación con *B. flexus* se le tiene que añadir una serie de nutrientes que ayudarán al proceso de fermentación, además de la levadura, que es la responsable de la producción del bioetanol.

Los factores más importantes que afectan a la producción son: el periodo de incubación, la temperatura, el pH, la concentración de glucosa y la concentración de levadura (inóculo). Por esto, que hay que prestar gran atención a los parámetros mencionados y estudiar qué ocurre si existen variaciones. Los autores estudiaron estas condiciones por separado, incubando a distintas temperaturas (15-45°C), a diferentes concentraciones de la levadura (2-10% v/v) y glucosa, pH y durante diferentes tiempos (10-70h), para luego centrifugar el medio y determinar la concentración de bioetanol y los azúcares reductores [7].

Se comprobó que el tiempo de incubación óptimo fue el de 10 horas (tiempo medio), debido a que tiempos demasiado largos dan concentraciones altas de bioetanol que acaban siendo tóxicas para *S. cerevisiae* y que además disminuye la concentración de nutrientes. Respecto a la temperatura, a altas temperatura el microorganismo comienza a estresarse e incluso se da la desnaturalización de proteínas, perdiendo así la capacidad enzimática, mientras que a bajas temperaturas la actividad enzimática no se efectúa. Por ello, determinan que la temperatura es un factor crítico que debe mantenerse a 30°C. Del mismo modo, con relación al pH, la fermentación es sensible a los cambios de pH porque los iones H⁺ pueden cambiar la carga de la membrana plasmática, produciendo una bajada de la permeabilidad de los nutrientes en la levadura. El pH óptimo es de 6.5.

Por otro lado, la concentración de la glucosa también es importante, ya que es un metabolito esencial para la fermentación. A mayor concentración más bioetanol se producirá, pero llegados a cierto punto la producción disminuye drásticamente debido a efectos inhibidores de la glucosa a altas concentraciones. La concentración óptima de glucosa es del 80%. Por último, la concentración óptima de la levadura se determinó en un 6%.

En condiciones óptimas los investigadores obtuvieron un rendimiento de hasta 60ml/l. Los autores declaran que con estos resultados se puede considerar a los lodos como una buena materia prima para la producción de bioetanol y que es una alternativa al uso de combustibles fósiles. Además, el bioetanol producido tenía unas características comparables con un biocombustible estándar [7].

Producción de biodiésel a partir de aceite de girasol.

El girasol (*Helianthus annuus* L.) es una de las principales plantas con semillas oleaginosas. Su composición de ácidos linoléico, oléico y linolénico afectan a la estabilidad oxidativa, siendo altamente susceptible a la oxidación. Esto lo hace un buen candidato para llevar a cabo la producción de biodiésel. Sin embargo, esta producción presenta limitaciones.

La producción anual de aceite de girasol es de 25'1 millones de toneladas. Si esta cantidad se dividiera para la producción de biodiésel y para alimentación, nos encontraríamos con dos grandes inconvenientes. Por un lado, el aumento del precio del aceite de girasol y su suministro en la industria alimentaria. Por otro lado, la cantidad destinada a producción de biodiésel no sería suficiente para satisfacer las necesidades. Debido a estas limitaciones, hoy en día sigue siendo tema de estudio el intentar llevar a cabo una producción industrial de biodiésel a partir de aceite de girasol [8].

Mecanismos de producción de biodiésel:

- Craqueo térmico (pirólisis), ya mencionada anteriormente [9]. El equipamiento de este mecanismo es caro para los rendimientos obtenidos.

- Microemulsiones: consiste en una dispersión coloidal de equilibrio de microestructuras fluidas ópticamente isotrópicas con dimensiones de entre 1-150 nm formadas de manera espontánea a partir de dos líquidos inmiscibles. Las microemulsiones con butanol, hexanol y octanol cumplen el requisito máximo de viscosidad para el N°2 diesel [10].

- Uso directo y de mezclas: el uso directo o mezclas de aceites vegetales se considera poco satisfactorio y poco práctico, tanto para los motores diésel directos como motores indirectos. Este método presenta una gran variedad de problemas como son: alta viscosidad, contenido en ácidos grasos libres, formación de goma debido a la oxidación, polimerización durante el almacenamiento y combustión y el espesamiento del aceite, entre otros [9].

- Transesterificación (alcoholisis): es la reacción de una grasa o aceite (aceite de girasol) con un alcohol (metanol) para formar ésteres (biodiésel) y glicerol. Actualmente, la transesterificación es el proceso más utilizado para la producción de biodiésel a partir de aceite de girasol. Se utilizan catalizadores para mejorar la reacción, como puede ser KOH, consiguiendo una mejora en la velocidad y en el rendimiento. Debido a que la reacción es reversi-

ble, un exceso de etanol hace que se desplace el equilibrio hacia los productos (biodiésel y glicerol). El co-producto, glicerol, es recuperado debido a su valor como producto químico industrial [8].

Respecto a las condiciones necesarias para que se lleve a cabo de manera óptima la transesterificación, el catalizador debe estar a 0.28% p/p, la temperatura debe ser de 70°C y deben presentarse dos lavados, uno con agua ligeramente ácida gracias a la presencia de ácido fosfórico y el otro con agua pura [11].

Aún no se puede llevar a cabo la producción industrial de biodiésel a partir de aceite de girasol, ya que aún no se han superado las limitaciones que se presentan. Hay equipos de investigación que optan por la mezcla de aceites de avellana junto con el de girasol para obtener una mayor cantidad de materia prima [8].

Producción de biodiésel utilizando los fluidos supercríticos como solventes

Un fluido supercrítico (SCF) es un compuesto o mezcla de elementos por encima de su presión crítica (P_c) y temperatura crítica (T_c). Éstos pueden emplearse en la producción de biocombustibles sin la necesidad de emplear catalizadores. La separación del producto y la recuperación del catalizador son unos de los procedimientos más desfavorables en la producción de biodiésel ya que supone una gran pérdida económica, por ello gracias a estos SCF podría solucionarse dicho problema. Además, estos fluidos utilizados como solventes pueden inducir la formación de una sola fase entre los reactivos y los triglicéridos, favoreciendo dicha reacción.

A continuación, se citan los procesos de SCF de un solo paso para la síntesis no catalítica de biodiésel:

Alcohol supercrítico.

El metanol supercrítico (scMeOH) fue uno de los primeros SCF propuestos para la producción de biodiésel y sus parámetros críticos son $T_c = 239.4$ °C, $P_c = 8.1$ MPa y $\rho_c = 0.276$ g/cm³ [12]. Cuando se somete a un cambio de temperatura, 25 a 260 °C, y a una presión de 20 MPa, la constante dieléctrica (ϵ) disminuye pasando de 34 a 5, provocando que la red de enlaces de hidrógeno que existe en el metanol líquido se rompa, convirtiéndolo en un fluido en el que solo existen oligómeros pequeños y además facilita que se produzca un ataque nucleófilo directo mucho más fuerte. Una constante dieléctrica reducida permite también que se produzca una única fase de aceite aumentando así la velocidad de reacción [13].

Carbonato de dimetilo supercrítico (scDMC)

Por otra parte, se ha demostrado que el biodiésel se puede producir a partir de triglicéridos y dimetilcarbonato en las siguientes condiciones: $T_c = 274.9$ °C, $p_c = 4.6$ MPa. Con el scDMC, los triglicéridos y los ácidos grasos se convierten en ésteres metílicos de ácidos grasos, obteniéndose además otro compuesto secundario, el carbonato de glicerol, que tiene más valor comercial e industrial que el glicerol que se obtiene normalmente en la producción de biodiésel [12].

Acetato de metilo (scMeOAc)

Mediante el uso de scMeOAc se convierten los triglicéridos en ésteres metílicos de ácidos grasos y triacetina, en lugar de glicerol. Además, la triacetina aumenta el punto de fluidez (definida como la temperatura más baja a la cual un producto combustible comenzará a fluir) haciendo que el rendimiento sea del 105% [13].

Síntesis biocatalítica del biodiésel en fluidos supercríticos.

Otra forma de llevar a cabo la síntesis de biodiésel mediante fluidos supercríticos es utilizando lipasas fúngicas como biocatalizadores de la reacción, en sustitución de catalizadores químicos empleados normalmente en la reacción de biodiésel, como el ácido sulfúrico. Un ejemplo de ello es el uso de reactores discontinuos donde se llevó a cabo la síntesis de biodiésel con dióxido de carbono supercrítico (scCO₂), utilizando una mezcla de aceite vegetal y metanol y una mezcla de lipasas inmovilizadas de *Candida rugosa* y *Rhizopus oryzae* como biocatalizadores en las siguientes condiciones: 13.0 MPa de presión, 45 °C de temperatura, una velocidad de agitación de 250 rpm y las enzimas inmovilizadas al 20% (p/p), obteniendo como resultado un rendimiento del 100% en 2 h. Así, el uso de lipasas fúngicas es un camino prometedor en la producción de biodiésel [14].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITES DE COCINA USADOS.

Nuestro grupo realizó una práctica sobre la síntesis de biocombustibles. El experimento realizado en el laboratorio de química física de la Universidad Pablo de Olavide consistió en producir biodiésel mediante la reacción de esterificación de Fischer, a partir de aceite vegetal de cocina usado. Se ha organizado el experimento en tres grupos, dos para analizar el procedimiento de producción a partir de aceite usado de girasol de procedencia distinta y otro para el aceite usado de oliva.

Materiales y reactivos.

Reactivos: 1-propanol, ácido sulfúrico al 96%, hidróxido sódico y aceite vegetal usado.

Material: matraz de reacción (125 ml), sistema de calentamiento a reflujo, varilla magnética, baño de aceite, pHmetro, Erlenmeyer, embudo de decantación, viscosímetro, cronómetro, mecha, papel de plata y vasos de precipitado pequeños.

Metodología.

El proceso consiste una reacción de transesterificación en medio ácido, la cual tendrá lugar en la campana de gases. En un matraz se añaden 8 ml de 1-propanol, 0,15 ml de ácido sulfúrico al 96% y, por último, 20 ml de aceite vegetal (mismo procedimiento realizado para cada tipo de aceite). A continuación, se ajusta el matraz a un condensador de reflujo y se comienza la reacción, que debe darse durante 1h al menos a 100°C. Una vez terminada la reacción se espera a que se enfríe y se pasa a un embudo de decantación, donde se espera a que se separen las dos

fases correctamente, que serán la glicerina y el biodiésel producidos (Figura 1).

Además, se mide la viscosidad del aceite usado, para luego compararla con la viscosidad del biodiésel. Teóricamente, la viscosidad del biodiésel es menor y, por tanto, debe disminuir si la reacción se ha producido adecuadamente.

Resultados y discusión.

En el caso del aceite de oliva usado la separación de fases fue totalmente perfecta y rápida. Para el aceite de girasol, en uno de los casos acabó dándose la separación de fases al cabo de unos minutos y en el otro grupo no se observó separación de fases, por lo que se descartó esta muestra. Creemos que la ausencia de separación de fases es debido a que la reacción no se completó, ya que, como hemos mencionado en la revisión anterior, la reacción de producción de biodiésel a partir de aceite de girasol es más lenta y necesita catalizadores potentes, siendo posible que nuestro catalizador no fuese el más adecuado.

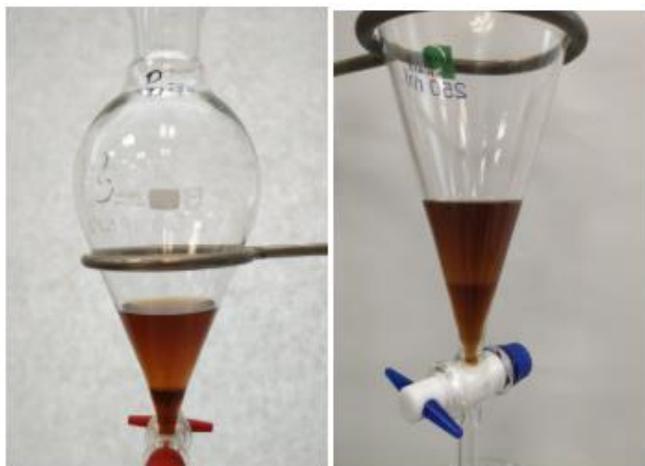


Figura 1. Separación de fases obtenida después de la reacción de Fischer a partir de aceite de oliva (izquierda) y a partir de aceite de girasol (derecha).

En la tabla 1 se ven los cambios de viscosidad entre ambos productos y es lo que nos confirma que la reacción se ha producido.

Tipo de aceite	Viscosidad aceite (cp)	Viscosidad biocombustible (cp)
Girasol	2,8	0,81
Oliva	4,3	1,5

Tabla 1. Viscosidad del aceite de oliva y aceite de girasol y sus respectivos biodiésel producidos a temperatura ambiente.

3. CONCLUSIONES

Los biocombustibles son una fuente renovable de combustibles orgánicos cada vez más investigada y demandada. El principal método de obtención de biodiésel a partir de aceite de girasol es la transesterificación, que se apoya en el uso de catalizadores y temperaturas relativamente altas. Los lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas son una buena matriz orgánica productora de bioetanol, aunque ciertas condiciones deben medirse minuciosamente para que la reacción ocurra óptimamente. Las técnicas más usadas en la generación secundaria de biocombustibles son la torrefacción, licuación, pirólisis y gasificación, cada una con sus ventajas e inconvenientes. También se describen los principales compuestos utilizados como fluidos supercríticos para la generación de biocombustibles y de sus condiciones.

REFERENCIAS

- [1] C. Liu, K. Li, Y. Wen, B. Geng, and Q. Liu, *Bioethanol: New opportunities for an ancient product*, 1st ed. Elsevier Inc., 2019.
- [2] C. A. Sánchez Riaño, A. M.; Gutiérrez Morales, A.; Muñoz Hernández, J. A. y Rivera Barrero, "Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos," *Rev. Tumbaga*, vol. 5, pp. 61-91, 2010.
- [3] R. Kumar, S. Chatterjee, and P. Behari, "Bioethanol production from waste lignocelluloses: A review on microbial degradation potential," *Chemosphere*, vol. 231, pp. 588-606, 2019.
- [4] V. Alfonsín, R. Maceiras, and C. Gutiérrez, "Bioethanol production from industrial algae waste," vol. 87, pp. 791-797, 2019.
- [5] Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578-597.
- [6] Zhang, J., & Zhang, X. (2019). The thermochemical conversion of biomass into biofuels. In *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy* (pp. 327-368).
- [7] Manyuchi, M., Chiutsi, P., Mbohwa, C., Muzenda, E., & Mutusva, T. (2018). Bio ethanol from sewage sludge: A bio fuel alternative. *South African Journal Of Chemical Engineering*, 25, 123-127. doi: 10.1016/j.sajce.2018.04.003
- [8] Saydut, A., Erdogan, S., Kafadar, A., Kaya, C., Aydin, F., & Hamamci, C. (2016). Process optimization for production of biodiesel from hazelnut oil, sunflower oil and their hybrid feedstock. *Fuel*, 183, 512-517. doi: 10.1016/j.fuel.2016.06.114
- [9] Sonntag (1979). Reacciones de grasas y ácidos grasos. Los productos industriales de grasa y aceite de Bailey, vol. 1, 4ª edición, ed. Swern, D., John Wiley & Sons, Nueva York, p. 99)
- [10] Preparación y propiedades de los combustibles diesel a partir de aceites vegetales. *Fuel*, 66 (1987), pp. 1372 - 1378.
- [11] Antolán, G. (2002). Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. *Bioresource Technology*, 83(2), 111-114.
- [12] Ilham, Z., & Saka, S. (2009). Dimethyl carbonate as potential reactant in non-catalytic biodiesel production by supercritical method. *Bioresource Technology*, 100(5), 1793-1796.
- [13] Hiejima, Y., Kajihara, Y., Kohno, H., & Yao, M. (2001). Dielectric relaxation measurements on methanol up to the supercritical region. *Journal Of Physics: Condensed Matter*, 13(46), 10307-10320.

- [14] Lee, J., Kim, S., Kang, S., Song, Y., Park, C., Han, S., & Kim, S. (2011). Biodiesel production by a mixture of *Candida rugosa* and *Rhizopus oryzae* lipases using a supercritical carbon dioxide process. *Bioresource Technology*, 102(2), 2105-2108. doi: 10.1016/j.biortech.2010.08.034E.E.



María Dolores Cortés-Sánchez, recibió el grado en Biología por la Universidad de Sevilla en 2017. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.



Esperanza Macarena Gata-Montero, recibió el grado en Biología por la Universidad de Sevilla en 2017. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.



Andrea Pipió-Tertero, recibió el grado en Biología por la Universidad de Sevilla en 2017. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.



Álvaro Rodríguez-Rivas, recibió el grado en Nutrición Humana y Dietética por la Universidad de Granada en 2018. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.



Juan Manuel Sánchez-Santos, recibió el grado en Biología por la Universidad de Sevilla en 2017. Actualmente estudia en la Universidad Pablo de Olavide el primer curso del máster de biotecnología ambiental, industrial y alimentaria.

Efectividad de intervenciones de actividad física dirigidas desde la escuela sobre el rendimiento académico y desarrollo cognitivo del alumnado

Daniel Carranco Gordillo

Resumen— Los datos reflejados en diferentes informes educativos reflejan los bajos resultados académicos de los alumnos españoles, mostrándose como un aspecto social preocupante. Una forma de actuar sobre esto podría ser a través de intervenciones de actividad física desde la escuela, aumentando el tiempo de actividad física semanal de los menores. Esto se encuentra relacionado con el efecto positivo que podría tener la actividad física sobre el rendimiento académico y el desarrollo cognitivo, por lo que se ha llevado a cabo una revisión de los estudios existentes sobre el tema en cuestión, con el objetivo de determinar si la actividad física tiene algún tipo de influencia sobre el rendimiento académico y el desarrollo cognitivo en menores. Además, en caso de que exista dicha relación, se buscará identificar el tipo de intervención más efectivo para generar dichas mejoras. Para ello se ha realizado una búsqueda en 5 bases de datos de estudios dirigidos desde la escuela con una población comprendida entre la etapa de primaria y secundaria. Finalmente, se observan mejoras en estas variables gracias a las intervenciones realizadas, siendo las más efectivas aquellas que aumentan el tiempo de actividad física a través de las sesiones de Educación Física o bien la realización de descansos activos.

Palabras Claves— Educación física, Cognición, Educación primaria, Educación secundaria.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El rendimiento académico (RA) es un aspecto del ámbito escolar que preocupa a estudiantes, padres, profesores y autoridades. Esto no solo ocurre en nuestro país, sino también en otros muchos países de otros continentes [1]. Esta preocupación se debe al bajo nivel académico de los alumnos españoles reportado por el informe PISA.

Teniendo en cuenta la importancia dada al RA, se debe otorgar de la misma manera una gran importancia a la cognición al presentar una estrecha relación entre sí [2].

Por otro lado, la neurociencia muestra que, tanto la actividad física (AF) como el ejercicio físico, se encuentran ligados a la secreción de diferentes factores neurotróficos derivados del cerebro (BDNF), favoreciendo el desarrollo mental [3]. Esto se debe a que esta proteína tiene, entre otras, la función de mejorar las conexiones neuronales, aumentar la vascularidad cerebral y formar neuronas a partir de células madre.

Con todo ello, el objetivo de esta revisión se centra en extraer conclusiones generales sobre si la AF tiene algún tipo de influencia sobre el RA y el desarrollo cognitivo (DC) de los menores y, en caso de que exista alguna relación, qué tipo de intervención es el más adecuado/efectivo para generar esta mejora académica y cognitiva que tanto preocupa en la actualidad.

2. METODOLOGÍA DE BÚSQUEDA

Durante marzo y abril de 2018, se llevó a cabo una búsqueda en 5 bases de datos: SportDiscus, SCOPUS, PubMed, Web of Science y ERIC, sobre artículos existentes hasta la fecha en relación a intervenciones escolares de actividad física enfocadas a la mejora del rendimiento académico y cognitivo.

2.1. Estrategia de búsqueda

Se basó en la combinación de un conjunto de términos comunes en todas las bases de datos mencionadas:

(Academic performance or academic achievement or cognition or cognitive performance or cognitive achievement) AND (physical activity or physical education or sport or fitness) AND (intervention or program or programme or experimental) AND (adolescent or teenager or child or youth or young) AND (school).

Fig. 1. Combinación de términos.

2.2. Criterios de inclusión y exclusión

Se usaron un conjunto de criterios de inclusión y exclusión para la selección de los artículos pertinentes a incluir en la presente revisión. Estos criterios son los que se muestran en la Tabla 1.

3. RESULTADOS

3.1. Proceso de selección y criterios de calidad

El proceso seguido para llevar a cabo la selección de artículos se muestra en la Figura 1. Como se puede observar, es un proceso estructurado en 4 fases donde se identificaron 3113 artículos en el sondeo inicial, de los cuales fueron incluidos 31 tras aplicar los diferentes criterios de inclusión y exclusión y eliminar los diferentes trabajos que aparecieron duplicados.

TABLA 1
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

<i>Criterios de inclusión</i>	<i>Criterios de exclusión</i>
Estudio de intervención dirigido desde la escuela.	Cualquier idioma diferente al inglés y español.
Población comprendida entre las etapas educativas de primaria y secundaria.	Estudios metodológicos.
Población sana.	
Estudio disponible a texto completo.	

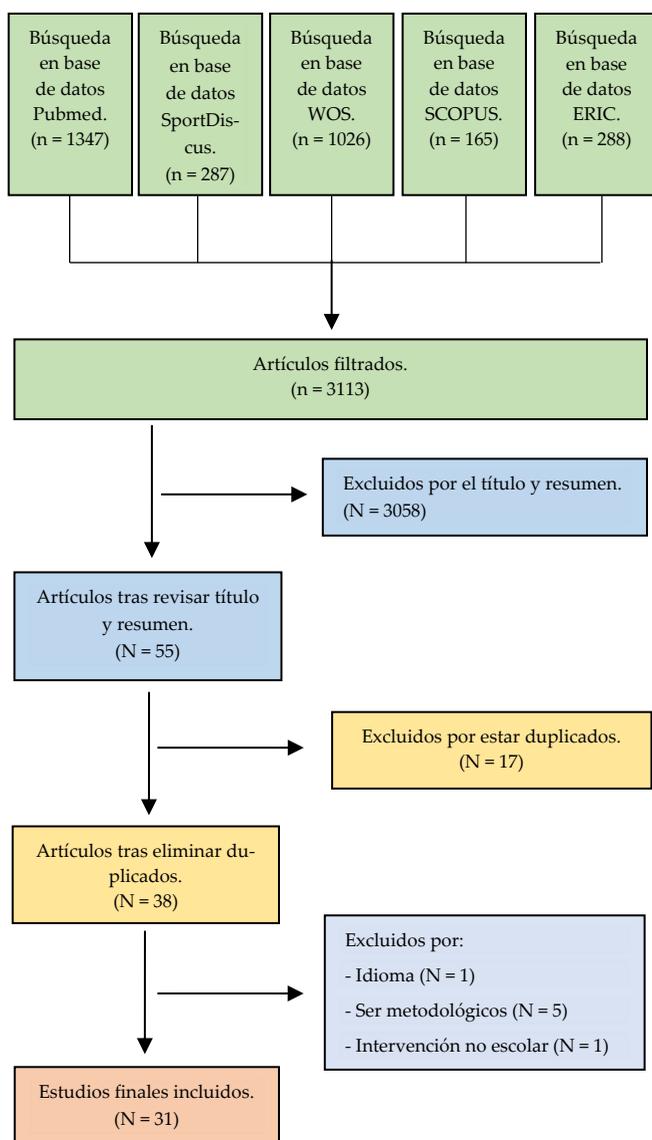


Fig. 2. Diagrama de flujo de la estrategia de búsqueda.

3.2. Descripción de los estudios

La muestra total incluyó 86.335 participantes, siendo la muestra menor de 29 participantes y la mayor de 74.189. La edad de los participantes abarca desde los 6 hasta los 20 años. De todos los artículos analizados, un total de 16 evalúan el RA de los alumnos, 9 evaluaban el DC, 3 la atención selectiva, que es un proceso cognitivo, y 3 valoraban de forma conjunta el RA y el DC.

Los tipos de intervenciones de AF más comunes para incrementar el RA y RC desde la escuela han sido dos: (i) el aumento del tiempo de Educación Física (EF) realizada en horario escolar y (ii) los descansos activos de cualquier tipo. Dentro de los mencionados en primer lugar encontramos intervenciones que se centran en el aumento de días que los alumnos llevan a cabo sesiones de EF. El número más común de sesiones semanales asciende a 3, encontrando algunas intervenciones que lo superan, y el tiempo de sesión varía de 30 a 60 minutos según el tipo de intervención. Además de estos métodos de intervención, encontramos otros en menor cantidad que inciden en el aumento de la intensidad de la AF en términos de FC realizada por los escolares, intervenciones deportivas o de danza.

De manera general, se observa como la AF influye de manera positiva en la mayoría de los casos $n = 23$ [4], [5] [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]. En los resultados de estas intervenciones los efectos positivos no siempre existían en todas las pruebas de evaluación, sino que en algunos de ellos solo afectaba de forma positiva en algunas de las asignaturas medidas o pruebas realizadas. Sin embargo, se pueden identificar de igual forma algunos estudios en los que la relación entre ambas variables no era significativa $n = 6$ [27], [28], [29], [30], [31], [32] y, por tanto, concluyen que la AF y el RA y/o el DC no se encuentran relacionados. Travlos [33] muestra cómo una misma intervención resultó eficaz para la mejora del RA al desarrollarse a 1^a, 3^a y 5^a hora, pero al implementarse a 6^a hora los resultados fueron incluso contrarios. En otro estudio, estos efectos positivos afectan a la memoria visual y aprendizaje y el efecto negativo recaía sobre la memoria de trabajo [34].

4. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LA EVIDENCIA CIENTÍFICA

Como se puede comprobar, los principales hallazgos señalan que un aumento de la AF realizada en los centros educativos provoca que los alumnos alcancen, en un mayor grado, los objetivos académicos propuestos y mejores resultados en las pruebas cognitivas llevadas a cabo. De esta forma el RA y el DC de niños y adolescentes aumenta de manera directa.

Algunos de estos artículos defienden que el aumento de la frecuencia de las sesiones de EF supone una mejoría en las variables dependientes evaluadas [6], [10]. Este aumento de la frecuencia supone un aumento del tiempo total de AF semanal. En esta línea se encuentran otros artículos que defienden que, el simple aumento del tiempo sin variar la frecuencia con la que se imparten las clases de EF ya repercute de forma positiva [5], [7]. Cabe destacar dentro de estos tipos de intervenciones un artículo que menciona que los efectos beneficiosos sobre el RA podrían permanecer incluso un año después de la misma [20]. Estos artículos se

encuentran rebatidos por otros en los que no se aprecia esta influencia de forma tan evidente, no obteniendo resultados significativos [28], [30].

El otro tipo de intervenciones llevadas a cabo en mayor medida, junto con las mencionadas en el párrafo anterior, son aquellas que proponen descansos activos o clases más activas [4], [11], [14], [21], [22]. Estas intervenciones, al igual que las anteriores, aumentan el tiempo total que el alumno se encuentra activo a lo largo de la jornada escolar, obteniendo los mismos resultados positivos tanto en el RA como en el DC. De esta forma, no solo se mejoran las variables mencionadas, sino que se educa a los jóvenes en un estilo de vida activo que le llevará a una mejor salud. Sin embargo, aparecen dos artículos que muestran una relación no significativa [27], [32].

Por otro lado, aparecen intervenciones que aumentan la intensidad provocando una mejora significativa positiva a favor de los sujetos que realizan AF de este tipo [5], [8], [19]. Estos resultados se contradicen con los obtenidos en otros artículos, que muestran como la realización de AF de alta intensidad no se relaciona de forma significativa con una mejora académica y cognitiva [31].

También existen evidencias de intervenciones de tipo concurrente que, a grandes rasgos, muestran resultados positivos [34]. De modo que, el uso del trabajo aeróbico y de fuerza, podría ser otra opción diferente y novedosa para los alumnos con la que trabajar. Finalmente, el resto de los artículos, llevan a la práctica intervenciones de naturaleza deportiva, danza, e incluso llegan a usar videojuegos como forma de AF en la escuela. Este tipo de intervenciones aparece de forma minoritaria.

Por último, en cuanto a las intervenciones, hay que añadir que no se han encontrado intervenciones de AF desarrolladas en la escuela o desde ésta que presenten una disminución global del RA o DC del alumnado.

Por todo lo comentado, se cree conveniente aumentar las horas e intensidad de las clases de EF y que se realicen con mayor frecuencia aumentando el número de clases semanales de esta asignatura. Incluyendo en el currículo de educación primaria y secundaria diferentes actividades de las utilizadas en los estudios dentro de esta asignatura como medio de mejora del RA y DC de los estudiantes. Otra medida interesante que se puede tomar por todo el colectivo educativo sería desarrollar las clases de todas las asignaturas de forma activa e incluir descansos con actividades lúdicas y dinámicas en las que los alumnos puedan distraerse durante un breve periodo de tiempo. De esta forma, serán capaces de mantener la atención de forma más eficiente durante más tiempo y mejorar su rendimiento como se ha comprobado.

En último lugar y, como respuesta a la pregunta sobre el tipo de intervención idóneo para generar la mejora académica y cognitiva de los niños y adolescentes, se podría establecer que los planes de actuación a utilizar podrían ser diversos puesto que se ha demostrado su eficacia. Pero en caso de tener que decantarse por uno u otro, lo más sensato sería hacerlo por el aumento del tiempo total de AF semanal a través de las sesiones de EF o por los descansos activos. Puesto que son los tipos de intervención más estudiados y sobre los que mejores referencias existen.

4.4. Principales limitaciones

Como limitaciones encontramos que los artículos incluidos no han pasado ningún criterio de control de calidad, la falta de control por parte de los estudios del tiempo real que cada alumno se encontró en movimiento durante la intervención y que la mayor parte de los estudios realizan un análisis del RA y DC de forma más o menos aislada, sin controlar las posibles variables contaminantes. Relacionado con la metodología se puede añadir que carece de carácter doble ciego al ser realizada por un evaluador.

5. CONCLUSIONES

La AF es un medio efectivo por el que se puede conseguir un aumento del RA y DC, mejorando diferentes funciones cerebrales y ejecutivas de los menores. El aumento del tiempo total de AF realizada a la semana parece ser suficiente para conseguir estas mejoras. Otras herramientas útiles, aunque con menor rigor de uso al no haber sido estudiadas lo suficiente serían el uso de deportes, danza o entrenamiento concurrente. El aumento de la intensidad no ha sido demostrado como método efectivo para la mejora del RA o DC al obtener resultados no significativos en los estudios que analizaban esta relación. Por todo esto, se considera como mejor opción el uso de los descansos y lecciones activas o el aumento del tiempo total de AF realizada en la escuela a la semana. Bien sea mediante el aumento de la duración o frecuencia con la que realizan EF o bien mediante el uso de lecciones y/o descansos activos a lo largo del horario escolar. Esta afirmación viene respaldada por el mayor número de artículos registrados en la presente revisión, siendo una elección más segura al estar más contrastada.

REFERENCIAS

- [1] H. Lamas, "Sobre el rendimiento escolar", *Propósitos y Represent.*, vol. 3, no. 1, pp. 313–386, 2015.
- [2] C. Hannaford, *Smart moves. Why learnign is not all in your head*. Great Ocean Publishers, 2005.
- [3] Muñoz, Pérez, Navarro, and Díaz, "Condición física y su vinculación con el rendimiento académico en estudiantes de Chile", *Rev. Latinoam. Ciencias Soc.*, vol. 15, no. 1, pp. 309–325, 2017.
- [4] T. M. Altenburg, M. J. M. Chinapaw, and A. S. Singh, "Effects of one versus two bouts of moderate intensity physical activity on selective attention during a school morning in Dutch primary schoolchildren: A randomized controlled trial", *J. Sci. Med. Sport*, vol. 19, no. 10, pp. 820–824, 2016.
- [5] D. N. Ardoy, J. M. Fernández-Rodríguez, D. Jiménez-Pavón, R. Castillo, J. R. Ruiz, and F. B. Ortega, "A Physical Education trial improves adolescents' cognitive performance and academic achievement: The EDUFIT study", *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–10, 2014.
- [6] L. Bunketorp Käll, H. Malmgren, E. Olsson, T. Lindén, and M. Nilsson, "Effects of a Curricular Physical Activity Intervention on Children's School Performance, Wellness, and Brain Development", *J. Sch. Health*, vol. 85, no. 10, pp. 704–713, Oct. 2015.
- [7] M. E. Cöster, J. Fritz, C. Karlsson, B. E. Rosengren, and M. K. Karlsson, "Extended physical education in children aged 6-15 years was associated with improved academic achievement in boys", *Acta Paediatr.*, pp. 0–3, 2018.
- [8] S. A. Costigan, N. Eather, R. C. Plotnikoff, C. H. Hillman, and D. R. Lubans, "High-Intensity Interval Training for Cognitive and Mental Health in Adolescents", vol. 48, no. 10. 2016.

- [9] A. Dalziell, J. Boyle, and N. Mutrie, "Better movers and thinkers (BMT): An exploratory study of an innovative approach to physical education", *Eur. J. Psychol.*, vol. 11, no. 4, pp. 722–741, 2015.
- [10] I. Ericsson and M. K. Karlsson, "Motor skills and school performance in children with daily physical education in school - a 9-year intervention study", *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, vol. 24, no. 2, pp. 273–278, 2014.
- [11] H. Erwin, H. Fedewa, and S. Ahn, "Student academic performance outcomes of classroom physical activity intervention: a pilot study", *Int. Electron. J. Elem. Educ.*, vol. 4, no. 3, pp. 473–487, 2012.
- [12] Z. Gao, "The Impact of an Exergaming Intervention on Urban School Children's Physical Activity Levels and Academic Outcomes", *Asian J. Exerc. Sport. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 1–10, 2013.
- [13] C. Gouws, "Influence of an 8-week kinderkinetic movement programme on the scholastic performance of children aged 6-8 years", *African J. Phys. Heal. Educ. Recreat. Danc.*, vol. 21, no. 4.2, pp. 1355–1362, 2015.
- [14] E. K. Howie, J. Schatz, and R. R. Pate, "Acute Effects of Classroom Exercise Breaks on Executive Function and Math Performance: A Dose-Response Study", *Res. Q. Exerc. Sport*, vol. 86, no. 3, pp. 217–224, 2015.
- [15] K. Jäger, M. Schmidt, A. Conzelmann, and C. M. Roebers, "Cognitive and physiological effects of an acute physical activity intervention in elementary school children", *Front. Psychol.*, vol. 5, no. DEC, pp. 1–11, 2014.
- [16] L. B. Käll, M. Nilsson, and T. Lindén, "The impact of a physical activity intervention program on academic achievement in a swedish elementary school setting", *J. Sch. Health*, vol. 84, no. 8, pp. 473–480, 2014.
- [17] P. H. Kulinna, M. Stylianou, B. Dyson, D. Banville, C. Dryden, and R. Colby, "The Effect of an Authentic Acute Physical Education Session of Dance on Elementary Students' Selective Attention", *Biomed Res. Int.*, vol. 2018, no. c, 2018.
- [18] R. R. Lind *et al.*, "Improved cognitive performance in preadolescent Danish children after the school-based physical activity programme "FIFA 11 for Health" for Europe—A cluster-randomised controlled trial", *Eur. J. Sport Sci.*, vol. 18, no. 1, pp. 130–139, 2018.
- [19] J. K. Ma, L. Le Mare, and B. J. Gurd, "Four minutes of in-class high-intensity interval activity improves selective attention in 9- to 11-year olds", *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, vol. 40, no. 3, pp. 238–244, 2015.
- [20] E. McClelland, A. Pitt, and J. Stein, "Enhanced academic performance using a novel classroom physical activity intervention to increase awareness, attention and self-control: Putting embodied cognition into practice", *Improv. Sch.*, vol. 18, no. 1, pp. 83–100, 2015.
- [21] M. J. Mullender-Wijnsma, E. Hartman, J. W. de Greeff, R. J. Bosker, S. Doolaard, and C. Visscher, "Improving Academic Performance of School-Age Children by Physical Activity in the Classroom: 1-Year Program Evaluation", *J. Sch. Health*, vol. 85, no. 6, pp. 365–371, Jun. 2015.
- [22] M. J. Mullender-Wijnsma, E. Hartman, J. W. de Greeff, S. Doolaard, R. J. Bosker, and C. Visscher, "Physically Active Math and Language Lessons Improve Academic Achievement: A Cluster Randomized Controlled Trial", *Pediatrics*, vol. 137, no. 3, pp. e20152743–e20152743, 2016.
- [23] J. Reed, G. Einstein, E. Hahn, S. Hooker, V. Gross, and J. Kravtitz, "Examining the impact of integrating physical activity on fluid intelligence and academic performance in an elementary school setting: a preliminary investigation", *J. Phys. Act. Health*, vol. 7, no. 3, pp. 343–351, 2010.
- [24] J. A. Reed, A. L. Maslow, S. Long, and M. Hughey, "Examining the Impact of 45 Minutes of Daily Physical Education on Cognitive Ability, Fitness Performance, and Body Composition of African American Youth", *J. Phys. Act. Heal.*, vol. 10, no. 2, pp. 185–197, 2013.
- [25] G. K. Resaland *et al.*, "Effects of physical activity on schoolchildren's academic performance: The Active Smarter Kids (ASK) cluster-randomized controlled trial", *Prev. Med. (Baltim.)*, vol. 91, pp. 322–328, 2016.
- [26] J. F. Sallis, T. L. McKenzie, B. Kolody, M. Lewis, S. Marshall, and P. Rosengard, "Effects of Health-Related Physical Education on Academic Achievement: Project SPARK", *Res. Q. Exerc. Sport*, vol. 70, no. 2, pp. 127–134, 1999.
- [27] Y. Ahamed, H. Macdonald, K. Reed, P.-J. Naylor, T. Liu-Ambrose, and H. McKay, "School-Based Physical Activity Does Not Compromise Children's Academic Performance", *Med. Sci. Sport. Exerc.*, vol. 39, no. 2, pp. 371–376, Feb. 2007.
- [28] A. Bugge *et al.*, "Influence of a 2- to 6-year physical education intervention on scholastic performance: The CHAMPS study-DK", *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, vol. 28, no. 1, pp. 228–236, 2018.
- [29] A. T. Harveson *et al.*, "Acute Effects of 30 Minutes Resistance and Aerobic Exercise on Cognition in a High School Sample", *Res. Q. Exerc. Sport*, vol. 87, no. 2, pp. 214–220, 2016.
- [30] Lisahunter, R. Abbott, D. Macdonald, J. Ziviani, and M. Cuskelly, "Active kids active minds: a physical activity intervention to promote learning?", *Asia-Pacific J. Heal. Sport Phys. Educ.*, vol. 5, no. 2, pp. 117–131, 2014.
- [31] A. Quinto Romani and T. B. Klausen, "Physical Activity and School Performance: Evidence from a Danish Randomised School-Intervention Study", *Scand. J. Educ. Res.*, vol. 61, no. 4, pp. 479–502, 2017.
- [32] J. Tarp, S. L. Domazet, K. Froberg, C. H. Hillman, L. B. Andersen, and A. Bugge, "Effectiveness of a school-based physical activity intervention on cognitive performance in Danish adolescents: LCoMotion-learning, cognition and motion - A cluster randomized controlled trial", *PLoS One*, vol. 11, no. 6, pp. 1–19, 2016.
- [33] A. K. Travlos, "High intensity Physical Education classes and cognitive performance in eight-grade students: An applied study", *Int. J. Sport Exerc. Psychol.*, vol. 8, no. 3, pp. 302–311, 2010.
- [34] M. Stenman, A. J. Pesola, A. Laukkanen, and E. A. Haapala, "Effects of Two-Week High-Intensity Interval Training on Cognition in Adolescents - A Randomized Controlled Pilot Study", *Hum. Mov.*, vol. 18, no. 2, pp. 15–20, 2017.



Daniel Carranco Gordillo Graduado en Educación Primaria con mención en Educación Física por la Universidad de Extremadura en 2017 y finalizó el Máster Universitario en Actividad Física y Salud de la Universidad de Cádiz en el año 2018. Su interés investigador se centra en la actividad física dentro del ámbito educativo y su relación con la salud.

“Nanoscaffolds” para la regeneración de lesiones medulares

Ekine Olaizola Bárcena, Paloma Guisado Hernández

Resumen

La regeneración del sistema nervioso central basada en nanotecnología se ha convertido en uno de los campos más interesantes de la ingeniería tisular, ya que el tratamiento de las lesiones o enfermedades de dicho sistema han sido un foco de investigación hasta la fecha. Sin embargo, no está siendo fácil encontrar una solución eficaz para abordar el tratamiento de este tipo de lesiones. Se sabe que el ambiente que se genera en la matriz extracelular tiene un fuerte impacto en los estados patológicos del sistema nervioso central y para contrarrestarlo, se ha aplicado la ingeniería de tejidos para restaurar la zona afectada. Para ayudar a esta regeneración, donde las células troncales neurales y los factores de crecimiento son esenciales, se ha visto que si los materiales que componen el soporte se sintetizan a base de polímeros con base nanoscópica, la nanoarquitectura del andamio o “scaffold” en el que se incluyen el resto de componentes se asemeja más a las dimensiones de la matriz extracelular. De este modo, se mejoran diferentes propiedades como la adhesión celular, la viabilidad de las células y su diferenciación a neuronas, además de mejorar las conexiones que se generan. Por otro lado, es importante combinar lo mencionado anteriormente con su biodegradabilidad, unas propiedades mecánicas fuertes y su compatibilidad con el sistema nervioso central. En esta revisión nos centramos en los nanomateriales más utilizados para el tratamiento de lesiones de la médula espinal, sus ventajas e inconvenientes.

Palabras Claves— Nanoscaffold, nanofibras, lesión médula espinal, óxido de grafeno, MnO_2

1. INTRODUCCIÓN

La lesión de la médula espinal (LME) hace referencia al daño causado en el tejido de la médula espinal (ME), generalmente tras un impacto físico externo, que provoca una incapacidad sensorial y motora irreversible, temporal o permanente, por lo que existe una necesidad crítica de desarrollar estrategias terapéuticas adecuadas y efectivas para tratarla [1][2].

De manera aguda, la agresión externa resulta en un daño primario del tejido causando la muerte de las células neurales, pero también se inicia una cascada de lesiones secundarias entre las que se encuentran isquemia, inflamación, una muerte neuronal y oligodendrocítica considerable y la formación de cicatrices gliales y cavidades quísticas [3]. Estos cambios tanto primarios como secundarios, alteran la composición celular y la arquitectura estructural de la zona de la lesión formando un microambiente no permisivo que impide la regeneración de los axones que, unido al pobre potencial de regeneración de las neuronas espinales, merman aún más la capacidad de recuperación, resultando en un daño neurológico permanente.

Dentro de estos cambios, son especialmente perjudiciales el edema generado en la zona de la lesión, que dificulta el aporte sanguíneo a la médula agravando la isquemia del tejido afectado, la formación de cavidades, que

generan un obstáculo físico natural para la regeneración nerviosa, y la rápida proliferación de astrocitos en el sitio de la lesión, ya que forman cicatrices gliales que pueden impedir aún más la regeneración axonal.

Este microambiente inhibitorio formado por la falta de factores nutricionales, la respuesta inflamatoria, la interrupción del flujo sanguíneo y otros elementos adversos en la lesión impide la regeneración nerviosa [4]. A nivel celular, tras una LME las células troncales neurales (Neural Stem Cells o NSC) endógenas se activan inmediatamente migrando a la zona afectada donde mayoritariamente se diferencian en astrocitos en lugar de a neuronas, formando una cicatriz glial que bloquea la regeneración de axones. Además, el microambiente resulta desfavorable tanto para las NSC como para la supervivencia de las neuronas, por lo que varias líneas de investigación se centran en promover la supervivencia de NSC endógenos y su diferenciación a neuronas, trasplantando biomateriales en combinación con diferentes factores de crecimiento en los sitios de la lesión.

En la actualidad no existe un tratamiento para la LME ni para la reparación de la médula espinal completamente transectada, por lo que todavía se considera uno de los problemas más desafiantes en la investigación clínica [1].

Aunque existen resultados prometedores en la terapia de LME en animales, el tratamiento que se sigue clínicamente se sigue enfocando en estabilizar la zona de la

lesión para prevenir daños mayores en el tejido, combatiendo uno o más de los inhibidores de la regeneración de la LME y, por tanto, mejorando las discapacidades funcionales a largo plazo.

El desarrollo de la ingeniería de tejidos ha abierto una puerta para tratar la LME. Las estrategias que se siguen incluyen ofrecer a las células dañadas un soporte que facilite la regeneración neural; se basa en inocular células vivas en matrices extracelulares (MEC) que pueden proporcionar una estructura física como soporte para el crecimiento y la diferenciación celular, orientar el crecimiento de las células trasplantadas y promover la regeneración axonal de las neuronas residuales [4].

Esta MEC generada a base de diferentes biomateriales se denomina scaffold y debe cumplir ciertos requisitos. Por un lado, mantener un equilibrio entre la suavidad y la resistencia mecánica que evite la compresión de los tejidos circundantes y mantenga la estructura.

Por otra parte, los materiales deben tener una porosidad, permeabilidad y topografía superficial adecuada y una buena compatibilidad. Además, su tasa de degradación debe coordinarse con la tasa de regeneración de axones y tejidos [4].

El uso de materiales naturales para el desarrollo de scaffolds aporta una gran variedad de ventajas debido a su buena biocompatibilidad, biodegradabilidad, baja toxicidad, interacción celular intrínseca y funcionalidad biológica. En la reparación de LME los materiales más comunes son colágeno, quitosano, ácido hialurónico, alginato, gelatina, agarosa y fibrina [4].

Además de esto, los materiales sintéticos poseen numerosas ventajas en la medicina regenerativa, ya que generan una baja respuesta inflamatoria, se degradan de manera controlada, tienen baja o nula toxicidad, una porosidad controlable y unas propiedades mecánicas y físico-químicas ajustables, de manera que pueden mezclarse diferentes materiales para conseguir un material con unas características únicas.

Algunos de los más utilizados en el ámbito de la regeneración y el tratamiento de LME son el ácido poliláctico (PLA), poli(ácido láctico-co-glicólico) (PLGA), poli-β-hidroxibutirato (PHB) y polietilenglicol (PEG). En los últimos años se han utilizado diferentes materiales para la fabricación de scaffolds con la finalidad de tratar la LME teniendo en cuenta que tanto las propiedades fisicoquímicas como la estructura del soporte juegan un papel fundamental. Generalmente, los hidrogeles se sintetizan con materiales naturales y los scaffold con materiales sintéticos de tipo canal, por su facilidad de manipulación para generar determinadas estructuras y formas.

En resumen, para lograr un scaffold óptimo que trate la LME, se requiere una combinación de aproximaciones que utilicen células (NSC), factores de crecimiento y biomateriales que faciliten la regeneración.

En la Figura 1 se muestra un esquema del microambiente de la médula espinal intacta que se pretende imitar con el injerto [1].

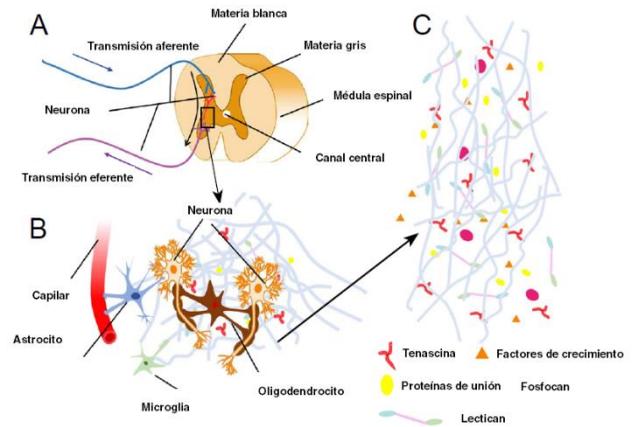


Figura 1. Microambiente de la médula espinal (Figura modificada de [2])

2. USO DE NANOMATERIALES PARA LA REPARACIÓN DE LME

Con el avance de la nanotecnología, se han comenzado a utilizar tanto en el diagnóstico como en el tratamiento de enfermedades neurológicas diferentes nanomateriales[3]. Debido a sus propiedades y estructura únicas, los nanomateriales pueden diseñarse como vectores de administración de fármacos para cruzar la barrera hematoencefálica y liberar moléculas específicas en células diana con mayor eficacia y seguridad que los sistemas neurológicos tradicionales, además de servir como soporte debido a su mejor adhesión celular entre otras ventajas [2].

En esta revisión nos centraremos en los principales materiales utilizados para la síntesis de nanoscaffolds. Se han utilizado diversos biomateriales, la mayoría sintéticos, para el tratamiento de la LME, algunos de ellos de forma nanoscópica. A continuación se presentan los más relevantes para el fin descrito anteriormente.

PLA: polímero obtenido por la polimerización del ácido láctico cuya característica principal es su gran biodegradabilidad. Estos scaffolds pueden sintetizarse con diferentes formas para la regeneración de la LME, entre ellas micro o nanofibras, hidrogeles y esponjas microporosas con canales internos.

PHB: poliéster con un alto peso molecular que se puede encontrar en diversos citoplasmas bacterianos. Se ha demostrado que posee una buena compatibilidad con los tejidos, baja inmunogenicidad y no genera necrosis tisular o abscesos in vivo; además se degrada lentamente después de ser implantado en el cuerpo humano, convirtiéndose en metabolitos no tóxicos que son secretados en la orina. Este biomaterial se ha utilizado ampliamente y ha sido aprobado por la Food and Drugs Administration). Xu et al. demostraron en 2010 que los scaffolds de nanofibras de PHB-HHx (un copolímero de 3-hidroxibutirato y 3-hidroxihexanoato) facilitaban el crecimiento y la diferenciación de las NSC, lo que indica que el PHB tiene potencial para tratar lesiones en el sistema nervioso central. Sin embargo no es el más utilizado para regenerar la LME debido a su fragilidad [2].

PEG: polímero no iónico soluble en agua capaz de sellar rápidamente la membrana neuronal dañada y disminuir el estrés oxidativo derivado de las mitocondrias para proteger la médula espinal lesionada [5][2].

PLGA: polímero orgánico degradable sintetizado por una polimerización aleatoria de ácido láctico y ácido glicólico y cuyas propiedades fisicoquímicas pueden modularse ajustando el ratio de monómeros. En diversos estudios se han utilizado hidrogeles, microesferas y nanopartículas de PLGA para la regeneración y recuperación funcional de la médula espinal y está aprobado por la FDA como vehículo para células [6] [2].

La combinación de biomateriales naturales y sintéticos puede resultar muy eficaz para mejorar el rendimiento de los scaffolds en la reparación de LME. Se han hecho ensayos en los cuales los nanoscaffolds están formados por una combinación de nanopartículas de médula espinal acelar y PLGA, que luego se encapsularon con el factor de crecimiento endotelial vascular.

Este scaffold de PLGA / nanopartículas promovía la angiogénesis y el remodelado vascular en un modelo de hemisección de la médula espinal de rata [2][7].

Los scaffolds compuestos por ambos materiales, naturales y sintéticos, son una dirección de investigación prometedora para la reparación de LME. Para lograr este objetivo se requerirá una cooperación de expertos en síntesis de materiales y neurobiólogos [2].

2.2. Avances en el tratamiento de LME a través de Nanoscaffolds

2.2.1. Nanofibras de óxido de grafeno con PLGA

Como se mencionaba anteriormente, el PLGA resulta atractivo por sus características, sin embargo, ni posee actividad que promueva la neurogénesis, ni su alta hidrofobicidad ayuda a la adhesión celular. Por lo tanto, la combinación de los biomateriales con factores de crecimiento, se ha convertido en una estrategia prometedora para solucionar el problema.

En los procedimientos convencionales, al combinar factores de crecimiento o medicamentos y materiales poliméricos, el proceso de polimerización se lleva a cabo mezclando los factores de crecimiento y los materiales. Sin embargo, la actividad de las proteínas puede verse dañada a consecuencia de los disolventes orgánicos y campos eléctricos que son utilizados durante el proceso.

Dentro de los nuevos métodos para la inmovilización de los factores de crecimiento que se están investigando, uno de los más prometedores son las nanoláminas de óxido de grafeno (GO), donde al oxidar el grafeno, obtenemos una monocapa de átomos de carbono organizada en una red bidimensional.

El GO posee un gran potencial para su aplicación en una gran variedad de campos debido a sus distintivas características fisicoquímicas, entre las que se incluyen gran volumen de carga, grupos funcionales hidrofílicos, baja toxicidad, biocompatibilidad y propiedades mecánicas extraordinarias. Además, puede unirse estrechamente a

diferentes proteínas por medio de interacciones electrostáticas. Estudios recientes muestran asimismo el potencial de GO en el campo de la neurociencia, ya que no sólo estimula la diferenciación de NSC en neuronas sino que también promueve la regeneración de axones y su orientación.

Su Pan et al. (2019) [8] ha llevado a cabo este estudio donde se utilizaron dos factores de crecimiento, el factor de crecimiento insulínico de tipo 1 (Insulin-like Growth Factor-1 o IGF-1) y el factor neurotrófico derivado del cerebro (Brain-Derived Neurotrophic Factor o BDNF), donde el primero estimula la proliferación tanto in vitro como in vivo de las NSC, además de regular la migración de éstas y poseer un claro efecto neuroprotector y el segundo facilita la diferenciación de nuevas neuronas, neuronas maduras e interneuronas y puede reducir la diferenciación a astrocitos en algunos casos. Para posibilitar la mayor supervivencia de las NSC endógenas, se han estudiado ambos factores de crecimiento en combinación.

En el estudio se creó un electrohilado de nanofibras de PLGA/GO cargadas con IGF-1 y BDNF que posteriormente se implantó en modelos de rata con una hemisección en la médula espinal, además de analizarlo también in vitro. Se vio que la liberación local de IGF-1 y BDNF inmovilizados en las nanofibras de PLGA/GO promueven la recuperación de SCI. Se demostró que GO aumenta la hidrofiliidad de la nanofibra ayudando así a la adhesión celular y a la adsorción de proteínas, permitiendo que los factores de crecimiento se adsorban adecuadamente, indicando que la incorporación de GO facilita la liberación de ambos factores de crecimiento. De este modo no solamente reduce la liberación brusca de IGF-1 y BDNF, sino que también mantiene un ratio de liberación estable.

Al investigar el crecimiento de las NSC en diferentes nanofibras bajo condiciones tanto fisiológicas como inflamatorias, se observó que las nanofibras de PLGD/GO/IFG-1+BDNF potenciaban efectivamente su proliferación.

El estrés oxidativo juega un papel importante en la patogénesis de SCI, ya que promueven la peroxidación de lípidos y al deterioro de macromoléculas que llevan a la muerte de la célula nerviosa que las hospeda. Para estudiar este proceso in vitro se realizó un tratamiento con H₂O₂ que induce un estrés oxidativo en la célula que imita el microambiente generado tras LME, donde se valoró el efecto neuroprotector de las nanofibras frente al estrés oxidativo. En este paso se observó que dentro de las nanofibras estudiadas, la que mostraba un mejor efecto en la proliferación de NSC y una mayor neuroprotección era la compuesta por PLGD/GO/IFG-1+BDNF. Al analizar los dos factores de crecimiento de manera individual, BDNF mostraba una clara diferenciación a neuronas mientras que IFG-1 inducía una mayor formación de astrocitos. Sin embargo, al combinar ambos factores, aumentaba en desarrollo de neuronas de manera sinérgica.

Tras la evaluación *in vitro*, se analizaron las diferentes nanofibras en modelos de rata, donde se vio que el tratamiento con membranas de PLGD/GO/IFG-1+BDNF mejoraba la función motora, disminuía la formación de cavidades quísticas y mejoraba la neurogénesis en el sitio de la lesión.

Las cavidades quísticas en el tejido de la médula espinal es un rasgo característico patológico tras LME, que dificulta la regeneración nerviosa. Los resultados indican que la liberación localizada de los factores IFG-1 y BDNF tras la lesión mejoran el llenado de la cavidad, mejorando las condiciones necesarias para la regeneración tisular. Los factores de crecimiento inmovilizados en las nanofibras, tienen un efecto neuroprotector que mejora el microambiente para favorecer el crecimiento de tejido en la médula espinal.

Finalmente se observaron mediante inmunofluorescencia las neuronas y astrocitos en la lesión, donde se detectó una importante correlación entre el número de neuronas en la región afectada y la neurogénesis, ya que los resultados mostraron que individualmente y en combinación, las terapias con factores de crecimiento incrementaban la viabilidad neuronal tras LME.

Aunque la nanofibra PLGA/GO únicamente no protegía a la célula en el microambiente inflamatorio inducido por H₂O₂, sí que aumentaba significativamente la diferenciación neuronal de NSC. Sin embargo, las células NeuN-positivas no mostraron diferencias significativas tras LME. Además, aunque PLGD/GO/IFG-1 ofrezca una mayor neuroprotección, el ratio de diferenciación neuronal en comparación con PLGD/GO/BDNF es menor.

Por otro lado, se ha visto que hay más células NeuN positivas en la lesión tras el implante por 4 semanas de PLGD/GO/IFG-1 que con PLGD/GO/BDNF, por lo que se concluye que pese a la estrecha relación con la viabilidad neuronal de los dos factores dominantes, el efecto neuroprotector de los biomateriales parece tener un papel importante en aumentar el número de neuronas tras la LME en fases tempranas. Pese a que los resultados *in vitro* mostraban una inhibición de la diferenciación de NSC a astrocitos mediada por las nanofibras de PLGD/GO/BDNF, *in vivo* no se observaron diferencias significativas por las que las nanofibras con alguno o los dos factores de crecimiento redujeran las cicatrices.

El estudio sin embargo muestra algunas limitaciones relacionadas con la toxicidad de las nanofibras de PLGA/GO que deben tenerse en cuenta de considerar perspectivas clínicas. Aunque varios estudios han demostrado que los scaffolds implantados en ratas compuestos por GO no han derivado en reacciones inflamatorias o adversas, este estudio está enfocado a la recuperación funcional, por lo que habría que analizar la biocompatibilidad en estudios dirigidos a periodos de observación más largos [8].

2.2.2. Nanoscaffold de MnO₂

La investigación de los nanoscaffold híbridos de MnO₂ biodegradables se centra primeramente en las nanoláminas de MnO₂ y su interacción con las proteínas de laminina, para comprobar el aumento de afinidad de éstas por las proteínas de la MEC (Figura 2).

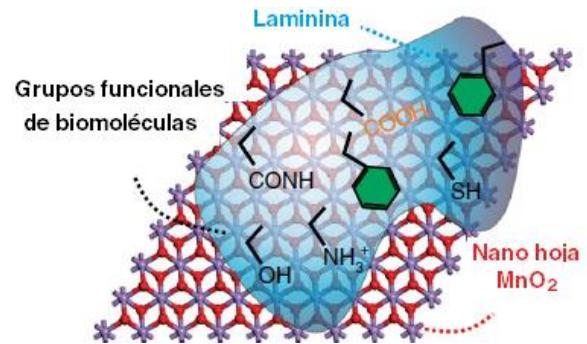


Figura 2. Unión intermolecular entre nanoláminas de MnO₂ y grupos funcionales seleccionados que comúnmente existen en las proteínas de MEC y las biomoléculas (Figura modificada de [3])

Este ensayo se lleva a cabo por medio de ácido binictínico, obteniendo resultados de 7.5 veces mayor la adsorción de laminina a las láminas de MnO₂ que a los cristales control y sustratos de polímeros (Figura 3).

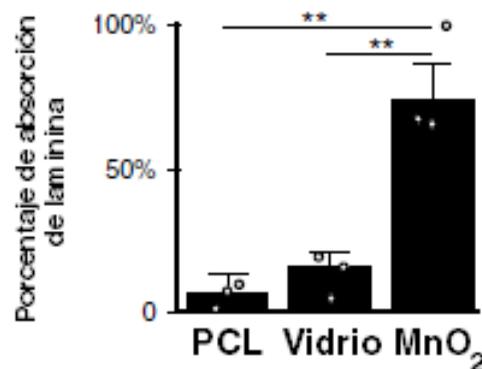


Figura 3. Comparación de unión de la laminina en la lámina de MnO₂ 2D, en comparación con los sustratos control, vidrio grabado y policaprolactona (PCL) (Figura modificada de [3])

Además de su afinidad por la MEC, estos soportes híbridos de MnO₂ son óptimos para la diferenciación de células madre pluripotentes inducidas (hiPSC-NSCs). Se refleja cómo a través de la síntesis por filtración al vacío se generan nanoscaffolds 3D de MnO₂ altamente homogéneos y reproducibles.

Al sembrar hiPSC-NSCs en nanoscaffolds 3D de MnO₂ recubiertos con laminina, se observa una mejora del 43% de la diferenciación neuronal con respecto a las condiciones control. Tras esto, se investigan las vías de señalización dependientes de la adhesión focal mediada por laminina relevante utilizando una técnica qRT-PCR, y se observó un aumento de 4,7 veces del gen de la quinasa de adhesión focal (FAK) y una regulación al alza de un gen GAP43 asociado al cono de crecimiento neuronal (36%) de las neuronas derivadas de hiPSC-NSC [3].

Los resultados obtenidos muestran que estos nanoscaffold 3D de MnO₂ pueden mejorar la diferenciación neuronal y el crecimiento de las neuritas, a través de la unión mejorada a la laminina y las vías relacionadas con la adhesión focal.

Para demostrar la biodegradación de estos nanoscaffolds de MnO₂ en microambientes extracelulares, primero se investigó la degradación de nanoláminas 2D de MnO₂ utilizando una solución acuosa de ácido ascórbico. Los datos del espectro de absorción de UV-Visible confirmaron que las nanoláminas 2D de MnO₂ se degradaron por el ácido ascórbico.

Uno de los usos más eficaces de estos nanoscaffold es el trasplante de células troncales para mejorar las lesiones de médula espinal. A través de la generación de hemisecciones torácicas en la T10 de la médula espinal a un grupo de ratones adultos se simulan estas lesiones. Posteriormente se insertan los nanoscaffold en la lesión hemiseccionada y se evalúa el éxito del ensayo a través de marcado genético con la proteína GFP (Green Fluorescent Protein) de las hiPSC-NSCs.

Después del trasplante, nos centramos en la capacidad de biodegradación del nanoscaffold in vivo, a través de la medida de Mn degradado en muestras de orina de ratón mediante el análisis de espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

De acuerdo con nuestros estudios previos in vitro, pudimos observar una rápida degradación in vivo de las nanopartículas. Esta degradación de nanoscaffolds trasplantados también se detectó por el cambio de color (de negro a marrón), de manera tiempo-dependiente a lo largo de la primera semana posterior al trasplante.

Después de investigar la biodegradabilidad in vivo, estudiamos los efectos del nanoscaffold 3D-BHI para mejorar el trasplante de células troncales. Para probar la hipótesis se realizó un ensayo de trasplante de células troncales a corto plazo incluyéndose tres condiciones de control diferentes de la condición de prueba en comparación con las otras 3 condiciones de control. El análisis posterior se llevó a cabo por inmunotinción, es aquí donde se observaron poblaciones celulares significativamente más altas, lo que sugiere directamente un trasplante mejorado de células troncales.

Superar el microambiente altamente inhibitorio, como la inflamación y las cicatrices astrogliales, se ha considerado como una estrategia eficaz para tratar la LME. Con estos resultados, se comprueba que este nanoscaffold 3D inorgánico biodegradable de MnO₂, podría utilizarse para el trasplante mejorado de células troncales y para el tratamiento de lesiones del SNC [3].

3. CONCLUSIÓN

La LME es un tipo de daño que al tratar de combatirlo presenta muchos obstáculos y retos. Mediante las nuevas alternativas que nos ofrece la nanotecnología, podemos generar nanoscaffolds que, gracias a sus medidas nanoscópicas, consiguen optimizar las características y propiedades fisicoquímicas de los materiales utilizados para mejorar su capacidad de regeneración, en el caso de los factores de crecimiento, o incrementar la supervivencia y conseguir la diferenciación celular adecuada en el caso de las células troncales inmovilizadas en la matriz artificial.

Por otro lado tenemos los inconvenientes que presentan tanto las LME, por su dificultad y complejidad ética a

la hora de encontrar un tratamiento eficaz, como los materiales nanoscópicos, ya que su toxicidad no está del todo caracterizada debido a que una mínima alteración en el tamaño de los materiales puede provocar un gran cambio en la respuesta del organismo.

REFERENCIAS

- [1] X. Li *et al.*, "Scaffold-facilitated locomotor improvement post complete spinal cord injury: Motor axon regeneration versus endogenous neuronal relay formation," *Biomaterials*, vol. 197, no. January, pp. 20–31, 2019.
- [2] S. Liu, Y.-Y. Xie, and B. Wang, "Role and prospects of regenerative biomaterials in the repair of spinal cord injury," *Neural Regen. Res.*, vol. 14, no. 8, p. 1352, 2019.
- [3] L. Yang *et al.*, "A biodegradable hybrid inorganic nanoscaffold for advanced stem cell therapy," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, 2018.
- [4] X. Y. Xu *et al.*, "The behaviour of neural stem cells on polyhydroxyalkanoate nanofiber scaffolds," *Biomaterials*, vol. 31, no. 14, pp. 3967–3975, 2010.
- [5] Y. Liu *et al.*, "Photodynamic therapy mediated by upconversion nanoparticles to reduce glial scar formation and promote hindlimb functional recovery after spinal cord injury in rats," *J. Biomed. Nanotechnol.*, vol. 12, no. 11, pp. 2063–2075, 2016.
- [6] B. A. Breen *et al.*, "Therapeutic Effect of Neurotrophin-3 Treatment in an Injectable Collagen Scaffold Following Rat Spinal Cord Hemisection Injury," *ACS Biomater. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 7, pp. 1287–1295, 2017.
- [7] M. Pang *et al.*, "Neural precursor cells generated from induced pluripotent stem cells with gelatin sponge-electrospun PLGA/PEG nanofibers for spinal cord injury repair," *Int. J. Clin. Exp. Med.*, vol. 9, no. 9, pp. 17985–17994, 2016.
- [8] S. Pan *et al.*, "Graphene oxide-PLGA hybrid nanofibres for the local delivery of IGF-1 and BDNF in spinal cord repair," *Artif. cells, nanomedicine, Biotechnol.*, vol. 47, no. 1, pp. 651–664, 2019.



Paloma Guisado Hernández, recibió por la Universidad de Burgos el título de Graduada en Ciencia y Tecnología de los Alimentos en 2017. Cursando actualmente el Máster de Biotecnología Sanitaria por la Universidad Pablo de Olavide.



Ekine Olaizola Bárcena, licenciada en Farmacia por la Universidad del País Vasco UPV-EHU en 2014. Cursando actualmente el Máster de Biotecnología Sanitaria por la Universidad Pablo de Olavide.

Aplicaciones biotecnológicas a la degradación de residuos plásticos

Alberto Pires Acosta

Resumen—El consumo y la producción de polímeros sintéticos se ha disparado desde el inicio de su producción en masa en la década de 1950, la acumulación de estos en ambientes terrestres y especialmente marinos supone un grave problema medioambiental a nivel global. Una de las principales causas de esto es lo difícil que resultan los plásticos de degradar debido a que requiere un proceso complejo y lento. Existen algunos organismos que poseen algunas propiedades que podrían permitirnos su uso en biorremediación. Dos de estos organismos son *Pseudomonas* sp. AKS2 e *Idonella sakainensis*, la primera capaz de crear biopelículas un microplásticos y la segunda capaz de sintetizar la PET hidrolasa. Aunque la puesta en práctica de técnicas eficaces a partir de estas todavía está lejos, ofrecen una esperanzadora visión para investigaciones futuras.

Palabras Claves— Biodegradación, Biorremediación, *Idonella sakainensis*, Plásticos, *Pseudomona*.

1. INTRODUCCIÓN

Ha pasado algo más de un siglo desde que Leo Baekeland sintetizará por primera vez en 1907 la baquelita, el primer polímero completamente artificial. Desde entonces, el número de plásticos distintos y su uso no ha hecho más que crecer, debido a su bajo coste de producción y sus características fisicoquímicas mayoritariamente: impermeabilidad, baja densidad, maleabilidad, durabilidad y resistencia a agentes físicos y químicos, incrementando su producción mundial de 1,5 millones de toneladas en 1950 a 348 millones de toneladas en 2017, esta última cifra, equivale a que se produjeron 46kg de plásticos por cada habitante del planeta durante ese año [1].

Sin embargo, precisamente su alta resistencia y durabilidad, así como su uso desenfrenado, han provocado la acumulación de estos como residuos, esencialmente polietileno (PE) y tereftalato de polietileno (PET), en ambientes terrestres y especialmente en marinos, provocando graves consecuencias medioambientales y ecológicas [2].

En este artículo profundizaremos en las causas y consecuencias de este problema y analizaremos varias líneas de investigación que podrían ofrecer nuevos enfoques a la solución de este problema desde la perspectiva de la biotecnología ambiental y de la biorremediación.

2. COMPRENDIENDO EL PROBLEMA

Para comprender el problema, es necesario saber qué es exactamente un plástico, la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC por sus siglas en inglés) los define los como: "término genérico usado para para el caso de materiales poliméricos que pueden contener otras sustancias para mejorar su rendimiento y/o reducir costes"[3]. Como se puede ver, esta es una definición vaga, en la que cabe lugar tanto polímeros semisintéticos como el celuloide y plásticos completamente sintéticos, como el polietileno. Sin embargo, en nuestro caso nos centraremos en los segundos, que son aquellos más ampliamente utilizados y los que conllevan una mayor dificultad para ser eliminados. Aquí se encuentran algunos de los más utilizados como el policloruro de vinilo (PVC), el tereftalato de polietileno (PET), o el polietileno (PE), tanto de baja (LDPE) como de alta densidad (HDPE); todos ellos termoplásticos [4]. La estructura de los residuos tanto del PET como del PE aparecen representadas en la figura 1.

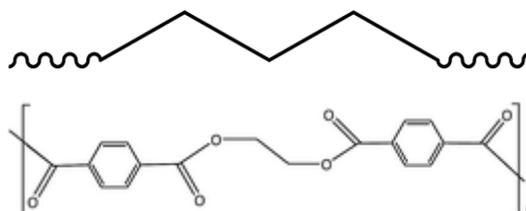


Fig.1 estructura del PE y del PET [5]

2.1. Ciclo de Vida de los Plásticos

Una vez desechados, los plásticos pueden persistir en el medio durante cientos e incluso miles de años a diferencia de la gran mayoría de polímeros naturales. La

baja velocidad del proceso se debe en parte, a su complejidad. En general, los residuos de plástico desechados son de un tamaño demasiado elevado como para que pueda actuar ningún proceso biodegradativo en ellos, por tanto, es habitual que haya un paso previo en el que los polímeros se rompen por mecanismos físicos para formar partículas más pequeñas conocidas como microplásticos (>5mm) y nanoplásticos (>100µm) [6]. Aunque la forma en la que esto ocurre es distinta para cada polímero, de forma general, se puede decir que la luz solar al incidir sobre los plásticos es capaz de provocar la ruptura de los enlaces del esqueleto de carbono del plástico formando radicales libres que pueden reaccionar con el O₂ dando lugar a fragmentos menores que contendrá en sus extremos distintos grupos funcionales como grupos ceto, hidroxilo o carboxilo [5],[7].

Aunque es un proceso necesario para el proceso de degradación natural, la formación de microplásticos acarrea por sí mismo otros problemas ecológicos, principalmente la ingestión de estos por accidente por parte de pequeños organismos que pueden incorporarlos en sus tejidos [8]. De esta forma la concentración de microplásticos en tejidos se hace cada vez mayor conforme escalamos en la cadena trófica, por lo cual, algunos animales, como las aves marinas son especialmente sensibles. Además, pueden estar presentes en pescado de consumo habitual humano, cuya ingesta tiene todavía consecuencias desconocidas para la salud [9].

Una vez son lo suficientemente pequeños, los fragmentos son capaces de atravesar las membranas de algunas bacterias que son capaces de incorporarlos al metabolismo central por distintas rutas metabólicas como el ciclo de los ácidos tricarbóxicos o el ciclo del glioxilato tal como se muestra en la figura 2 [5].

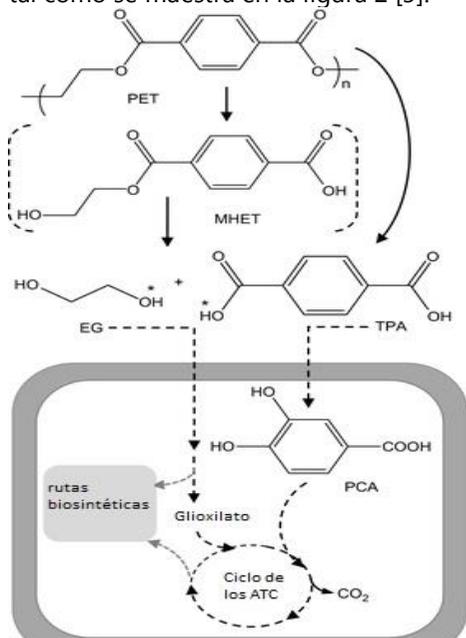


Fig. 2, ruta de degradación natural del PET [5]

Alternativamente, hay bacterias que son capaces de crecer formando biopelículas alrededor del plástico y secretar enzimas sobre éste [7]. Estas bacterias son de especial interés y las trataremos con mayor profundidad a continuación.

3. BIOTECNOLOGÍA EN DEGRADACIÓN DE PLÁSTICOS

En la naturaleza existen distintos grupos de bacterias capaces de formar estructuras conocidas como biopelículas. Estas estructuras se forman cuando una bacteria de vida libre se asienta sobre una superficie, secreta una matriz de polisacáridos y forman una colonia sobre ésta [10]. Algunas bacterias son además capaces de formar biopelículas sobre plásticos a la deriva por lo que resultan de gran interés en la degradación de estos compuestos.

3.1. Pseudomonas

Continuando con lo anterior, algunas de las bacterias que tienen una mayor relevancia son aquellas pertenecientes al género *Pseudomonas*, concretamente la cepa *Pseudomonas sp.* AKS2, de la cual ha sido documentada su capacidad para biodegradar polietileno de baja densidad sin que sea necesario un tratamiento previo [7]. La efectividad de esta cepa se debe no a solo a su capacidad de secretar enzimas capaces de degradar el LDPE sino también a su membrana celular especialmente hidrofóbica, que permite que se formen biopelículas sobre el plástico, lo cual puede llegar problemático para otras bacterias puesto que la superficie de la mayoría de los plásticos es muy hidrofóbica.

A pesar de esto, solo se ha conseguido un ritmo máximo de degradación de 1,65 mg de LDPE al día *in vitro* [7] por lo que sigue sin ser lo suficientemente efectivo para el uso de esta cepa en biorremediación. Además, existe otro inconveniente, los microplásticos pueden atravesar grandes distancias en el océano, de forma que, al formarse biopelículas sobre ellos, pueden actuar como vectores de las bacterias que contienen, propiciando procesos como la transferencia horizontal de genes entre ellas con consecuencias ecológicas aún desconocidas [11].

3.2. Idonella sakainensis

Además de las *Pseudomonas*, otra bacteria que también resulta de especial interés es la cepa *Idonella sakainensis* 201-F6, la cual es capaz de producir una enzima con la capacidad de descomponer uno de los plásticos más usados, el PET [4].

La PET hidrolasa es una enzima sintetizada y secretada de forma natural por esta bacteria y permite transformar el PET en monómeros de mono-2-hidroxi-etil tereftalato (MHET) que puede volver a degradar e incorporar a su metabolismo. Sin embargo, esta enzima tiene dos inconvenientes que hacen que sea difícil de purificar y

utilizar. En primer lugar, es muy poco estable y se desnaturaliza con mucha facilidad, especialmente en ambientes oxidantes que pueden provocar la formación de puentes disulfuro que desestabilicen su estructura. A esto hay que añadir también los bajos niveles de expresión y secreción de la enzima de forma natural, lo que impide que se puedan obtener fácilmente grandes cantidades de ésta.

A pesar de esto, y gracias a la ingeniería genética este segundo inconveniente puede ser evitado.

El proceso por el que esto se ha conseguido es mediante la inserción de un pequeño péptido líder en el extremo N-terminal de la proteína mediante una fusión traduccional. Este péptido actúa como una señal que es reconocida por transportadores de *E. coli* y permiten su exportación al espacio extracelular. Posteriormente el fragmento de ADN que contiene el gen junto al péptido es introducido en un vector de traducción como el mostrado en la figura 3 que incluye un promotor T7 el cual sobrexpresará la hidrolasa. Por último, se transforman bacterias *E. coli* competentes introduciéndoles el vector [12].

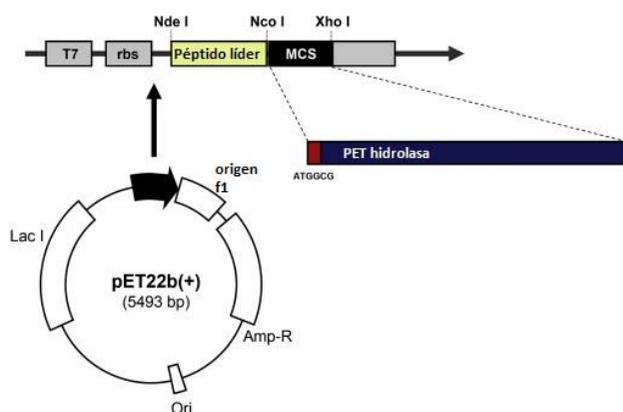


Fig. 3. Esquema del vector de expresión utilizado [12]

De esta forma, las bacterias transgénicas obtenidas expresarán y secretarán la PET hidrolasa con una eficiencia mucho mayor a la *Idonella sakainensis* original. Facilitando en gran medida la purificación, y por tanto la producción en masa de la enzima, posibilitando la utilización de esta directamente sobre residuos de PET.

Sin embargo, la vida media de la enzima sigue siendo baja y las condiciones de temperatura y pH óptimos para su funcionamiento (alrededor de 30°C y un pH entre 8 y 9) no se suelen dar en los ambientes oceánicos en los que se acumula este residuo, lo que hace que su uso siga siendo ineficiente y caro por la enorme cantidad de enzima que se necesitaría para aplicarse a un problema medioambiental real [12].

4. CONCLUSIÓN

La acumulación de residuos de plástico en mares y océanos es un problema cuya gravedad se incrementa conforme los años pasan y la producción estos aumenta.

Las líneas de investigación que hemos resumido aquí además de otras muchas ofrecen resultados esperanzadores para poner término a este hecho. Sin embargo, es necesario tener en cuenta todas estas vías se encuentran todavía en un estado muy inmaduro y serán necesario años e incluso décadas para obtener herramientas verdaderamente eficientes y eficaces. Además, es necesario comprender que lo expuesto es solamente una parte de la solución. No solo es necesario degradar los residuos ya existentes, también es necesario reducir la cantidad de estos que se producen, ya sea mediante el reciclaje o mediante la sustitución de plásticos por otros materiales menos contaminantes como biopolímeros. Solo de esta forma, conseguiremos lograremos un océano libre de plásticos

5. REFERENCIAS

- [1] M. Eriksen *et al.*, "Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea," *PLoS One*, vol. 9, no. 12, p. e111913, Dec. 2014.
- [2] K. L. Law, "Plastics in the Marine Environment," *Ann. Rev. Mar. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 205–229, Jan. 2017.
- [3] M. Vert *et al.*, "Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012)*," *Pure Appl. Chem.*, vol. 84, no. 2, pp. 377–410, 2012.
- [4] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 7, p. e1700782, 2017.
- [5] B. Gewert, M. M. Plassmann, and M. Macleod, "Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment," *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, vol. 17, no. 9, pp. 1513–1521, Sep-2015.
- [6] N. O. and A. A. US Department of Commerce, "What are microplastics?"
- [7] R. A. Wilkes and L. Aristilde, "Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 123, no. 3, pp. 582–593, Sep-2017.
- [8] Y. Chae and Y.-J. An, "Effects of micro- and nanoplastics on aquatic ecosystems: Current research trends and perspectives," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 124, no. 2, pp. 624–632, Nov. 2017.
- [9] S. L. Wright and F. J. Kelly, "Plastic and Human Health: A Micro Issue?," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 12, pp. 6634–6647, Jun. 2017.
- [10] T. Tolker-Nielsen, "Biofilm Development," *Microbiol. Spectr.*, vol. 3, no. 2, Apr. 2015.
- [11] M. Shen *et al.*, "Micro(nano)plastics: Unignorable vectors for organisms," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 139, pp. 328–331, Feb. 2019.

- [12] H. Seo, S. Kim, H. F. Son, H.-Y. Sagong, S. Joo, and K.-J. Kim, "Production of extracellular PETase from *Ideonella sakaiensis* using sec-dependent signal peptides in *E. coli*," *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, vol. 508, no. 1, pp. 250–255, Jan. 2019.



Alberto Pires Acosta (1999) natural de Huelva, estudiante de 2º de Biotecnología en la Universidad Pablo de Olavide

Contaminantes Químicos del Agua: Contaminación Antropogénica

Rosario Elena Armijo Miranda – Nathalia Vanini Basegio Castellani – Brinidilda Dolores Cofrade Romero – Teresa Ramos Carreño

Resumen— En este artículo se ha realizado una breve revisión sobre distintos contaminantes químicos, tanto orgánicos como inorgánicos y metales pesados, en medios acuosos. Se hace referencia a la importancia del contaminante, sus principales fuentes y se proponen algunas medidas de química verde para su prevención. Finalmente, se hace una ilustración de una práctica realizada donde se pretendía degradar contaminantes orgánicos mediante el proceso de fotocatalisis. Los resultados que se obtuvieron fueron coherentes y lógicos ya que, al realizar el proceso con lámparas más intensas, así como el uso de catalizadores hace que la reacción sea más rápida y eficaz. Con este trabajo se pretende divulgar la importancia de la contaminación en medios acuíferos y hacer una reflexión sobre la importancia no sólo de remediar lo que ya está presente sino también la de buscar medidas de prevención mediante ingeniería y química verde.

Palabras Claves— Bifenilos policlorados, Fosfatos, Fotodegradación, Herbicidas, Metales pesados.

1. INTRODUCCIÓN

Un agua está contaminada cuando se ve alterada en su composición o estado, en ocasiones como consecuencia de la actividad humana, quedando menos apta para el uso al que va destinada. La creciente cantidad de contaminantes en zonas costeras se produce como consecuencia del vertido de desechos industriales, urbanos, actividad agrícola, minera y portuaria, representando un peligro inminente para el ser humano y el medio ambiente. La actividad antropogénica es una constante amenaza para la estabilidad de los ecosistemas, siendo los sistemas acuáticos receptores de toda clase de desechos urbanos [1].

Considerando que los contaminantes del agua, tanto por su diversidad, naturaleza, comportamiento, importancia, así como por sus efectos o riesgos para la salud derivados de su presencia en el agua cuando se trata de aguas para consumo, se establecen las tres categorías en relación con su naturaleza: contaminantes de naturaleza química (inorgánicos y orgánicos), contaminantes de naturaleza biológica (por organismos patógenos) y contaminantes de naturaleza física (mecánica, térmica, radiactiva).

Nos centraremos en los contaminantes de naturaleza química. Dentro de los contaminantes químicos se encuentran los compuestos inorgánicos y orgánicos de las aguas. Entre los contaminantes inorgánicos se destacan los iones nitrogenados que se encuentran en forma de NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ y N orgánico. Los nitratos y los fosfatos son contaminantes muy comunes en las aguas continentales por su continuo uso en la agricultura. Tradicionalmente los fosfatos no se consideraban contaminantes ya que estos se usaban para fertilizar las tierras, pero actual-

mente se considera tan importante como los nitratos. Los contaminantes inorgánicos son productos disueltos o dispersos en el agua que provienen de descargas domésticas, agrícolas e industriales o de la erosión del suelo.

Los contaminantes orgánicos también son compuestos disueltos o dispersos en el agua que provienen de desechos humanos y animales, de rastros o mataderos, de procesamiento de alimentos para humanos y animales, diversos productos químicos industriales de origen natural como aceites, grasas y productos químicos sintéticos como pinturas, herbicidas, insecticidas, etc. Estos contaminantes consumen el oxígeno disuelto en el agua y afectan a la vida acuática [2].

Por otro lado, aunque muchos de los elementos metálicos son necesarios para el desarrollo de los organismos vivos, al exceder de una determinada concentración pueden resultar perjudiciales. Muchos de estos elementos tienen afinidad por el azufre provocando su inmovilización. Otros, como el cadmio, el cobre o el plomo (en forma iónica) forman complejos estables con los grupos amino y carboxílico, dificultando los procesos de transporte a través de las paredes celulares. Los metales pesados constituyen un importante problema mundial. Esta problemática se encuentra relacionada con su persistencia en el medio, y el consecuente factor de acumulación.

En este artículo se habla en más detalle de algunos contaminantes específicos como los pesticidas, PCBs, fosfatos y metales pesados debido a que su presencia en las aguas puede originar efectos de gran importancia. Se ha seleccionado estos contaminantes por la controversia actual en cuanto a su uso y alternativas posibles. Como ilustración se ha realizado una práctica sobre degradación de contaminantes orgánicos mediante el proceso de fotocatalisis.

2. CONTAMINANTES DEL AGUA

2.1. Herbicidas

Los herbicidas son compuestos orgánicos utilizados para combatir malezas en cultivos agrícolas y su presencia en la naturaleza se debe principalmente a la actividad antropogénica sobre el medio. Estos productos fitosanitarios son herramientas destinadas a la obtención de altos rendimientos de cultivos pero su utilización incontrolada junto con sales inorgánicas utilizadas como fertilizantes, son un potencial foco de impactos negativos sobre el ecosistema [3].

Estos compuestos tienen toxicidades muy variables que dependen de su estructura química e interacción con el organismo, pudiendo causar una variedad de efectos sobre la salud, desde erupciones cutáneas hasta la muerte [4]. Además de consistir en un potencial foco de contaminación y ofrecer riesgos para la salud humana, los residuos de herbicidas utilizados en cultivos también pueden causar fitotoxicidad para cultivos de rotación, lo que representa una amenaza en la cadena de producción alimentaria [5].

El principal inconveniente con los herbicidas radica sobre todo en su alta persistencia en el medio ambiente debido a la estabilidad de su estructura química [4]. Debido a esta estabilidad de las moléculas, los herbicidas pueden transportarse por el aire, suelo y aguas.

La volatilización de estos compuestos se produce inmediatamente después de la aplicación de los mismos a los cultivos, donde su principal efecto es la incorporación de estos productos a la atmósfera y su dispersión a sitios más alejados al punto de aplicación [6]. A su vez, los herbicidas y sus productos de degradación son altamente solubles en agua y su absorción en el suelo es muy limitada [7], por lo que su transporte a través del suelo por lixiviación y escorrentía superficial es un aspecto de gran preocupación [8]. Siendo así, los residuos de herbicidas ingresan al ecosistema acuático a través de diversos medios, como escorrentías superficiales directas, efluentes de unidades fabriles procesadoras de materias primas agrícolas, así como de formuladoras de pesticidas, lixiviación, gestión inadecuada del producto y su aplicación, derrames accidentales, entre otros [9].

La degradación química y biológica son los principales procesos que afectan el destino final de los herbicidas en el suelo [10].

El catabolismo microbiano es una vía importante para la disipación de herbicidas en el medio ambiente. Se aislaron varios microorganismos capaces de degradar diversos herbicidas, por lo que actualmente se cuentan con varias rutas metabólicas, genes y enzimas involucrados en el catabolismo de herbicidas y destinados a la biorremediación de sitios contaminados [4].

Entre los procesos de degradación química se pueden citar la degradación fotocatalizada y la hidrólisis. Para que

estos compuestos sufran fotodegradación es necesario que los mismos absorban energía lumínica, y puesto que la mayor parte de la radiación ultravioleta es absorbida por la capa de ozono, es de esperar que solamente sufran fotodescomposición natural en el suelo, aquellas estructuras capaces de absorber luz en el espectro visible [6].

Entre los tratamientos usualmente aplicados para el tratamiento de herbicidas en fuentes de aguas se pueden citar: la fotodegradación, la ozonización y la nanofiltración.

La fotodegradación, como mencionado anteriormente, es eficaz siempre y cuando se empleen fotocatalizadores y luz con la energía necesaria para que las estructuras químicas puedan absorberla. A su vez, la ozonización si bien representa el proceso más eficaz para la eliminación de estos compuestos, abarca costes elevados y su utilización a gran escala depende de las condiciones operativas que debe estudiarse para cada caso concreto. Por su parte, procesos de nanofiltración también puede presentar resultados satisfactorios para el tratamiento de aguas que contienen residuos de herbicidas, sin embargo, al consistir en un proceso de naturaleza física, los contaminantes no son tratados, sino que son derivados a otra matriz, en este caso a los lodos de las depuradoras, donde deben ser tratados posteriormente [11].

Como solución a los inconvenientes que puedan generar contaminación en el ecosistema, una de las herramientas de la química verde plantea la prevención de la contaminación. Para este caso es posible citar las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), definidas por la *Food and Agriculture Organization* (FAO) como prácticas orientadas a la sostenibilidad ambiental, económica y social para los procesos productivos de la explotación agrícola. Entre los puntos de las BPA que pueden influir en la prevención de contaminación por herbicidas se pueden citar: aplicación de dosis recomendadas; preparación de la cantidad justa a ser aplicada para evitar sobra de herbicidas en tanques de preparación; respeto de las bandas de seguridad establecidas entre el cultivo y zonas de cursos hídricos, caminos, entre otros; aplicación del producto en condiciones ambientales recomendadas, evitando la aplicación durante vientos fuertes, temperaturas elevadas, entre otros; realización del triple lavado de recipientes, como así también la gestión adecuada de los envases de agroquímicos.

Según la FAO, la formulación de un herbicida puede afectar su toxicidad, así el bromoxynil es más tóxico que bromoxynil octanoato [12]. Otro ejemplo de la toxicidad relacionada con la estructura química es el diquat, que como determina la *Environmental Protection Agency*, al ser absorbido sistémicamente no se concentra de manera selectiva en el tejido pulmonar como lo hace el paraquat, por lo cual la lesión pulmonar causada es menos grave [13].

Entonces, a partir de este aspecto, otro método de prevención es la formulación de estructuras químicas con efecto herbicida que representen menor nivel de toxicidad

sobre el ecosistema. Dicha técnica viene siendo explorada por las industrias debido a la resistencia que generan los herbicidas, pero también puede representar un punto importante para la producción de nuevas moléculas con efectos inhibidores de malezas, pero al mismo tiempo atenuando el impacto ambiental.

2.2. Fosfatos

Los fosfatos son contaminantes químicos inorgánicos y se presentan tanto disueltos como dispersos en el agua. El fósforo precipita en forma de fosfatos en suelos alcalinos y en suelos ácidos como fosfato de hierro (strengita) o de aluminio (variscita). En la actualidad la mayoría de países europeos aporta un exceso de nitrógeno y fósforo, incrementándose las reservas de estos en el suelo y aumentando el riesgo de emisión a los medios acuáticos [14]. Parte de los contaminantes de fósforo son obtenidos a partir de la roca de fosfato, de donde se extrae y procesa para obtener finalmente derivados de fósforo, como son el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el fósforo blanco (P_4) para diversas utilidades [15]. En general estos contaminantes provienen de descargas domésticas, agrícolas, industriales o de la erosión del suelo.

Se ha considerado que la principal fuente de contaminantes fosfatos eran los detergentes, pero se ha confirmado que tras el uso de detergentes sin fosfatos y la depuración de aguas residuales sigue persistiendo el problema de la eutrofización por altas concentraciones de fósforo en aguas superficiales [16]. Actualmente la agricultura se encuentra en el origen de numerosos casos de contaminación de aguas superficiales y freáticas [17]. De hecho, según informes de la EPA (*Environmental Protection Agency, de Estados Unidos*), el principal responsable de la mala calidad de las aguas continentales es la contaminación difusa causada por la agricultura y la ganadería en países donde éstos tienen una participación relevante en la economía. La contaminación de aguas por fósforo de origen agrícola se produce tanto a partir del fósforo soluble del suelo, como a partir del fósforo soluble de estiércoles, purines u otras enmiendas orgánicas, particularmente, cuando éstas se aplican sobre la superficie del suelo. Con frecuencia los estiércoles y purines tienen una relación P/N elevada en relación con las demandas de los cultivos. La aplicación de estos productos en suelos da lugar a una acumulación progresiva por el exceso de fósforo en el suelo, aumentando así el fósforo asimilable y el riesgo de contaminación de aguas [14].

Tradicionalmente los fosfatos no se denominaban contaminante ya que se utilizaban para mejorar la fertilidad y producción de las cosechas debido a la alta deficiencia de fósforo en los suelos naturales y a la escasez de este elemento en rocas y además los agrónomos los consideraban inmóviles en suelos. Actualmente se conoce que los iones fosfatos son retenidos por muchos componentes del suelo a pesar de su baja movilidad, sin embargo, en

los últimos años se ha demostrado por diversas investigaciones, cómo se ha incrementado dicha movilidad en suelos agrícolas [18]. El ion fosfato es adsorbido por diversos componentes del suelo, como óxidos y oxihidróxidos de hierro o aluminio y como aluminosilicatos no cristalinos (alofanos). El fósforo se empieza a exportar en cantidades importantes cuando se alcanza un valor crítico de concentración en el suelo, por eso se está notando ahora un incremento de este contaminante tras décadas de fertilización fosfatada [14].

Actualmente se considera que la presencia de fosfatos en aguas continentales superficiales es el principal factor responsable de los procesos de eutrofización. Se denomina eutrofización al enriquecimiento en nutrientes de las aguas superficiales, lo que origina la proliferación de algas y plantas acuáticas, provocando la pérdida de transparencia del agua y la disminución de la luz que llega a las capas que están bajo la superficie, produciendo así la muerte de otras algas y plantas, las cuales se descomponen consumiendo oxígeno. Lo que lleva a una considerable disminución de oxígeno disuelto y por tanto la pérdida de la biodiversidad marina. En algunos casos el crecimiento de algas y otras plantas acuáticas resulta indeseable porque dificulta el flujo del agua, tiene un efecto estético negativo o disminuye el valor recreativo del agua. El fósforo es un factor limitante en el proceso de eutrofización en aguas continentales y por tanto es muy importante su control para reducirlo [14].

El fósforo no tiene sustituto, pero se puede reutilizar continuamente para cerrar el ciclo global del fósforo, aplicando la química verde y la ingeniería verde. Para ello se puede abordar tres desafíos de sostenibilidad: 1) consumir menos roca fosfatada y con mayor eficiencia, 2) minimizar las pérdidas de fósforo y la generación de residuos de fósforo que ya no se pueden recuperar y 3) establecer objetivos de sostenibilidad económica, social y ambientalmente aceptables para reducir la demanda de fósforo [15]. Por otro lado, se podría también aplicar estrategias para reducir las pérdidas de fósforo en los suelos agrícolas, como: calcular la dosis de abono orgánico basándose en el fósforo en lugar del nitrógeno; incorporar el abono al suelo en lugar de aplicarlo sobre la superficie; añadir al estiércol o purín sales de Fe, Al o Ca para disminuir la solubilidad del fósforo; modificar la alimentación del ganado para disminuir la cantidad de fósforo en las heces; mantener el suelo con cubierta vegetal en invierno y no aplicar estiércol cuando la probabilidad de lluvia es alta [14].

2.3. Metales pesados

Los metales pesados son contaminantes inorgánicos cuya densidad está por encima de los 5 g/cm^3 [19]. Dentro de este grupo de sustancias encontramos el arsénico, cadmio, cobre, mercurio, níquel, zinc, cromo y plomo [20]. Algunos de estos metales a pequeñas concentraciones son necesarios para procesos biológicos vitales, sin em-

bargo, cuando sobrepasan estas limitaciones son altamente tóxicos [21]. En los últimos años, y con el desarrollo del sector industrial y agrícola, la contaminación por metales ha aumentado lo que lleva consigo un peligro ambiental importante para invertebrados, peces y seres humanos [22].

Las fuentes de emisión de estos contaminantes pueden ser naturales o antropogénicas [21]. Dentro de las fuentes naturales se encuentra el material rocoso de la corteza terrestre, el cual es rico en este tipo de metales, los afloramientos volcánicos o los incendios forestales [23]. En cuanto a fuentes antropogénicas, los efluentes industriales son más importantes, también contribuyen la minería, las actividades militares o la agricultura con la utilización de pesticidas, fungicidas y fertilizantes [23]–[25].

El peligro de estos compuestos se produce cuando llegan a los recursos hídricos y se introducen en la cadena alimenticia, ya sea de manera directa, cuando animales y seres humanos entran en contacto con aguas contaminadas, o de manera indirecta a través del consumo de cultivos que han sido regados con aguas contaminadas [22], [26], [27].

El mercurio, el arsénico y el plomo son los metales pesados más tóxicos puesto que son altamente tóxicos a concentraciones muy pequeñas, se utilizan en el sector industrial para la elaboración de baterías para coches, pigmentos, materiales semiconductores, equipos de medición como lámparas LED, en fertilizantes y pesticidas o en minería [21], [25]. Otros metales como el cromo, el níquel o el cadmio son considerados carcinógenos de grado 1 según la Agencia Internacional para la investigación del Cáncer, además, participan en la extracción de minerales, en la elaboración de conservantes para madera, agentes anticorrosivos, monedas, placas de acero o acero inoxidable [27].

Los efectos tóxicos de estas sustancias dependen de la concentración en la que se encuentren y de las rutas de exposición. Causan graves daños en la salud provocando cánceres, daños en los sistemas nervioso, circulatorio e inmunológico, incluso, en dosis muy elevadas pueden llegar a provocar la muerte (Tabla 1).

TABLA 1
EFECTOS DE LA TOXICIDAD DE METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA [26].

Metal Pesado	Efecto	mg/L
As	Marcas cutáneas, cánceres, enfermedades vasculares	0,050
Cd	Daños y trastornos renales, carcinógeno humano, enfermedad de itai-itai	0,01
Cr	Dolor de cabeza, diarrea náuseas, vómitos, carcinógeno	0,05
Cu	Daño hepático, enfermedad de Wilson, insomnio	0,25
Ni	Dermatitis, náuseas, asma crónico, tos, carcinógeno	0,20
Zn	Depresión, letargo, signos neurológicos	0,80

Metal Pesado	Efecto	mg/L
Pb	Daño cerebral fetal, enfermedades en riñones, sistema circulatorio, nervioso e inmunológico	0,006
Hg	Artritis reumatoide, enfermedades en riñones, sistema circulatorio, nervioso e inmunológico	0,00003

Mediante la tecnología verde se desarrollan tecnologías innovadoras para proteger la salud humana y la de los ecosistemas, minimizando los desechos industriales y reduciendo el impacto. Sin embargo, y aunque se ha intentado exigir procesos industriales sostenibles para conservar los recursos, a nivel práctico poco se ha logrado [28]. A pesar de esto, propuestas como la recuperación de metales pesados a partir de residuos industriales como aparatos electrónicos o baterías gastadas para reducir la contaminación al prescindir de materiales vírgenes o la introducción del concepto de “Electrónica Verde” en la que se prohíbe el uso de Pb^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} o Cr^{6+} en nuevos dispositivos electrónicos, pueden contribuir a paliar el problema ocasionado por estos contaminantes [28], [29]. Por otro lado, se puede promover el tratamiento directo de los efluentes contaminados antes de su descarga en los recursos hídricos mediante la eliminación fisicoquímica de los metales ya sea por absorción (zeolitas o quitosán), filtración por membrana o fotocatalisis, o mediante la utilización de agentes quelantes [26], [28].

2.4. Bifenilos policlorados (PCB)

Los bifenilos policlorados o PCB son una familia de compuestos orgánicos (hidrocarburos policlorados) que se sintetizan por cloración catalítica del bifenilo y está constituida por una mezcla de productos clorados en distinto grado, en las que se han identificado hasta 209 miembros denominados congéneres [30]. Son productos químicos industriales producidos sintéticamente que se utilizan para diversos fines, transformadores y condensadores eléctricos, como líquidos de intercambio de calor, como aditivos de pintura, en papel de copia sin carbón y en plásticos.

Los PCB están constituidos por un núcleo de bifenilo en el que existen hasta 10 posiciones susceptibles de ser cloradas. Su fórmula general es: $C_{12}H_{10-n}Cl_n$ (Fig 1).

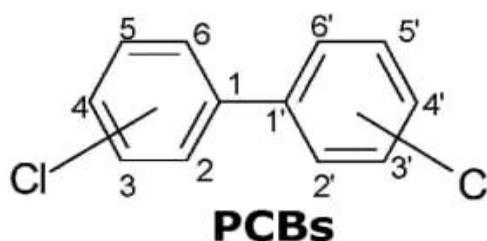


Fig 1. Estructura molecular PCB.

Las propiedades de los PCB dependen del grado de cloración de los anillos del bifenilo [30]. La estructura química de los PCB, les confieren características que permiten usarlos en innumerables aplicaciones industriales. Entre sus principales propiedades se pueden mencionar: estabilidad (ya que poseen inercia química); resistencia a la acción de ácidos y bases; difícilmente oxidables; hidrofóbicos; lipofílicos; se bioacumulan; se biomagnifican; no corrosivos; no volátiles; resistencia a la acción del calor y a las elevadas temperaturas; buenos conductores de calor, por ello es posible usarlos como fluidos térmicos; buenos aislantes eléctricos, ya que tienen altas constantes dieléctricas; estables hasta los 200°C, pero se empiezan a descomponer entre 200°C y 450°C; a temperaturas entre 450°C y 1000°C, es posible la combustión con la producción de dioxinas y furanos [30].

Uno de los primeros fabricantes fue una pequeña empresa situada en la pequeña población de Anniston (Alabama, USA) que comenzó su producción en la década de 1920. El uso masivo de estos productos se generalizó en la década siguiente, cuando la empresa fue comprada por Monsanto y lideró la producción de PCBs en la segunda mitad del siglo XX. El PCB se utilizaba como refrigerante de transformadores, pero en 1976, después de un accidente, fue prohibido en Estados Unidos y Europa. Hoy existen alternativas al PCB mucho más seguras como los aceites de silicona o ciertos tipos de aceites minerales dieléctricos. Hoy se utilizan transformadores secos para reemplazar a los que necesitaban refrigerantes líquidos [31].

La producción de PCB se detuvo en 1977 debido a preocupaciones ambientales y de salud humana, pero estos compuestos altamente persistentes, tóxicos y bioacumulativos aún permanecen en el medio ambiente como contaminantes globales [31].

Hoy en día, la fabricación y utilización de PCB está prohibida o sometida a restricciones importantes en muchos países, debido a su posible impacto sobre la salud y el medio ambiente.

Efectos de los PCBs en el medio ambiente:

En ríos y lagos, los PCB quedan adheridos a sedimentos en los que pueden quedar enterrados durante mucho tiempo antes de ser liberados al agua y al aire. Los PCB presentes en el aire pueden llegar al suelo con la lluvia o la nieve, o simplemente al depositarse las partículas por efecto de la gravedad [32]. En aguas superficiales, los PCB están presentes en cantidades sustanciales en los sedimentos. Tienden a adherirse a la superficie de la materia orgánica, la arcilla y las micropartículas que aún están suspendidas en el agua o que ya se han asentado. Pueden permanecer enterrados en los sedimentos durante mucho tiempo y ser liberados lentamente en el agua y evaporarse en el aire [32].

La presencia de PCB en el medio acuático es preocupante, no solo por su toxicidad directa, sino también por su ca-

pacidad para acumularse en los tejidos adiposos de los organismos acuáticos y luego biomagnificarse con cada nivel trófico. El hombre también puede, por lo tanto, acumular los PCB procedentes de su alimentación. Algunas especies animales, entre las que se cuentan las aves, los peces, los mamíferos, los insectos y otros invertebrados, pueden descomponer o transformar determinados tipos de PCB dentro de su cuerpo [32].

Influencia de los PCBs a las diatomeas y en consecuencia a la cadena alimentaria:

Las diatomeas son los vegetales más pequeños del océano, también los más numerosos y constituyen la mayor biomasa de plantas del planeta. Las diatomeas, al igual que el resto de las plantas posee aceite, una pequeña gota de aceite junto a su núcleo. Cuando la molécula de PCB se pone en contacto con el aceite entra en solución y la almacena ya que no es capaz de degradar este compuesto [32]. Lo que sucede es que las diatomeas conforman la base alimentaria del océano, entonces el resto de animales, peces, bivalvos, todo tipo de invertebrados y, por supuesto, las ballenas y los delfines, en los que es aún más letal por el efecto de bioagregación, ya que amamantan a sus crías con una leche muy rica en grasas en las que se acumulan altísimas concentraciones tóxicas, están implicados en la contaminación de PCB, porque el krill consume diatomeas y una ballena consume millones de organismos de krill. Las orcas, que forman el último eslabón de una cadena alimentaria marina extensa, se encuentran entre los mamíferos con el mayor nivel de PCB en sus tejidos. Los investigadores hallaron valores tan altos como 1.300 miligramos por kilogramo en el tejido graso de este mamífero acuático. A modo de comparación, una gran cantidad de estudios demuestran que los animales con niveles de PCB de unos 50 miligramos por kilo de tejido pueden mostrar signos de infertilidad e impactos graves en el sistema inmunitario [33].

Los investigadores han analizado los tejidos grasos de crustáceos carroñeros recogidos en las fosas marianas y han encontrado concentraciones extraordinarias de PCB y polibromodifenil éteres (PBDEs), compuestos usados en electrodomésticos y otros aparatos eléctricos [34].

Los crustáceos de las Marianas presentan una concentración de PCB 50 veces mayor que los cangrejos del Liahoe, uno de los ríos más contaminados de China [34]. El único otro punto del Noroeste del Pacífico con valores comparables a los de las Marianas es la Bahía de Suruga, en Japón, una zona muy industrializada con un alto uso de químicos organoclorados. La contaminación por PCB en la fosa Kermadec es menor, al igual que la de PBDEs, pero, lo que destaca es que los niveles de contaminación en las profundidades son equiparables a los de zonas costeras, mucho más cercanas al origen de los contaminantes, resaltan los investigadores [34].

3. PRÁCTICA EXPERIMENTAL: FOTODEGRADACIÓN DE RODAMINA B EN PRESENCIA DE CATALIZADOR TiO₂

Existen varios procesos de degradación de materia orgánica utilizados en el tratamiento de aguas. Esta degradación consiste básicamente en la oxidación de la materia orgánica en dióxido de carbono y agua. Los procesos de oxidación avanzada (AOP) proporcionan una opción de atenuación viable y efectiva incluso para compuestos que no son degradados por la acción de microorganismos, entre los cuales se pueden citar a los procesos de ozonización, irradiación ultravioleta, oxidación electroquímica, oxidación basada en ultrasonido, entre otras [35]. En la práctica experimental por lo tanto se realiza la oxidación de materia orgánica mediante la oxidación avanzada con luz ultravioleta en presencia de un catalizador.

3.1. Método y Materiales

De manera a ilustrar el proceso de degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos se procede a realizar la fotodegradación de Rodamina B catalizada por dos dosis distintas de dióxido de titanio nanocristalino.

Frecuentemente, la fase inicial de las reacciones de fotodegradación involucran la ruptura de un compuesto químico para la formación de radicales libres; estos subproductos inestables inician reacciones posteriores con el solvente, otras moléculas orgánicas, radicales libres u otros reactantes [6].

Siendo así, el TiO₂, semiconductor de banda ancha, al absorber radiación ultravioleta suficientemente energética crea pares de electrón-hueco cuya vida media se encuentra en el rango de nanosegundos. En este lapso los electrones deben migrar a la superficie y reaccionar con otras especies. En caso de que no exista reacción, los electrones vuelven a su estado energético liberando energía. El proceso neto por lo tanto consiste en la catálisis de la reacción entre un compuesto oxidante (TiO₂) y un reductor (Rodamina B). En la Fig. 2 es posible observar un esquema del proceso fotocatalítico.

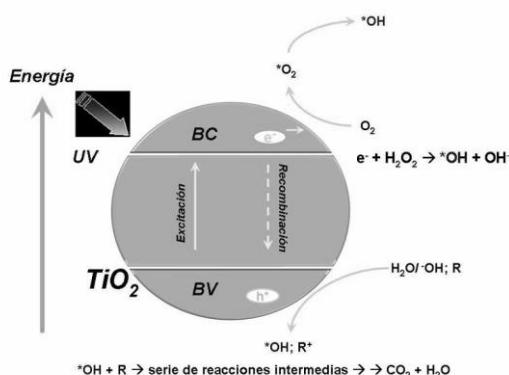


Fig 2. Esquema del proceso de fotocatalisis heterogenea [36].

Para la degradación fotocatalítica se utiliza una solución

de Rodamina B ($\approx 95\%$) 2.10^{-4} M y dióxido de titanio nanocristalino DEGUSSA P25 como fotocatalizador en dos dosis, 0,01 g/L y 0,1 g/L.

La reacción es fotocatalizada con una lámpara ultravioleta LOT de 150 W. Previamente a la medición de la absorbancia se procede a la centrifugación de la muestra con una centrífuga CENCOM II a 3000 rpm durante 14 minutos, de manera que las nanopartículas de TiO₂ en suspensión no interfieran en la radiación absorbida para la cuantificación de Rodamina B presente en la solución. Para la obtención de los valores de absorbancia se emplea un espectrofotómetro Zuzi Model 4101 a 554 nm.

3.1. Discusión y Resultados

➤ Recta de Calibrado

Para la obtención de la recta de calibrado se parte de una solución de Rodamina 2.10^{-4} M la cual se diluye según los valores observados en la Tabla 2. La absorbancia (A) se obtiene a 554 nm.

TABLA 2
RECTA DE CALIBRADO

Concentración (M)	Absorbancia (554 nm)
$5,0.10^{-7}$	0,051
$1,0.10^{-6}$	0,112
$1,5.10^{-6}$	0,169
$2,0.10^{-6}$	0,211
$2,5.10^{-6}$	0,270
$3,0.10^{-6}$	0,284
$5,0.10^{-6}$	0,462
$7,5.10^{-6}$	0,819
$1,0.10^{-5}$	1,053

Luego, es posible obtener la ecuación de calibrado, la correlación lineal y la absorptividad representando la absorbancia (A) frente a la concentración (C).

$$A \text{ (unidades)} = 105327 C \text{ (M)} - 0,005$$

$$\text{Absorptividad} = 105327 \text{ L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$$

➤ Fotodegradación de Rodamina B con 0,1 g/L de TiO₂

Se procede a la irradiación de una muestra de Rodamina B $2,09.10^{-4}$ M con una lámpara ultravioleta de 150 W en presencia de 0,1 g/L de TiO₂ donde la absorbancia se mide a distintos tiempos.

➤ Fotodegradación de Rodamina B con 0,01 g/L de TiO₂

De manera análoga a la anterior se procede a fotodegradar una solución de Rodamina B $2,09.10^{-4}$ M en presencia de 0,01 g/L de TiO₂.

En ambos casos existe una tendencia decreciente de la concentración de Rodamina B con el tiempo, como se puede observar en la Fig. 3, donde la línea continua indica la tendencia lineal para 0,1 g/L TiO₂ y la línea discontinua

representa la dosis igual a 0,01 g/L de TiO_2 .

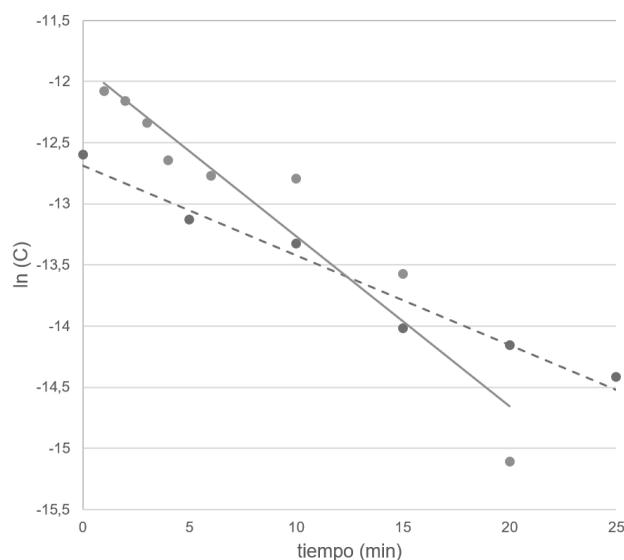


Fig 3. Concentración de Rodamina B en función al tiempo: disminución de la concentración de Rodamina B con el tiempo utilizando una concentración de 0,1 g/L de TiO_2 (línea continua) y 0,01 g/L de TiO_2 (línea discontinua).

Suponiendo que la degradación de Rodamina B sigue una cinética de primer orden respecto a la concentración de este compuesto, es posible determinar la constante de velocidad de reacción a partir del valor de la pendiente de ambas rectas. Así mismo, se procede a calcular el tiempo de vida media a partir de los datos de la constante de velocidad de reacción para cada caso. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3
TIEMPOS DE VIDA MEDIA Y CONSTANTES DE VELOCIDAD DE REACCIÓN

Concentración de TiO_2	0,1 g/L	0,01 g/L
Constante de velocidad de reacción	0,1392 min^{-1}	0,0735 min^{-1}
Tiempo de vida media	5 min	9 min

Se observa por lo tanto que a mayor concentración de fotocatalizador el tiempo de vida media tiene un valor menor, indicando que es degradado con mayor rapidez a una radiación constante. Esto se debe a que, a mayor concentración de fotocatalizador se forman mayor cantidad de pares electrón-hueco, habiendo una mayor probabilidad de oxidación de la materia orgánica y, por ende, se acelera la reacción.

5. CONCLUSIONES

El agua es uno de los recursos más importantes de la tierra, por ello, su contaminación constante supone un impacto ambiental importante del cual debemos preocuparnos. Que las principales fuentes de contaminación sean de

origen antropogénico, sector industrial y agrícola mayormente, implica una mayor responsabilidad por nuestra parte ante este problema.

De los contaminantes estudiados en esta revisión, para fosfatos y pesticidas existen formas de reducir o prevenir su efecto nocivo que son afines a la filosofía de la química verde, técnicas como la fotodegradación, por ejemplo. Sin embargo, de contaminantes inorgánicos altamente tóxicos como PCBs y metales pesados aún queda mucho por poner en práctica. Los mecanismos utilizados para evitar su contaminación se basan en la inutilización sin el adecuado tratamiento de los residuos existentes o tratamiento de aguas ya contaminadas, no existen técnicas de prevención o reducción de estos contaminantes que sean realmente efectivas.

REFERENCIAS

- [1] A. Fargašová, "Comparative study of ecotoxicological effect of triogatonin compounds on various biological subjects," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 36, pp. 38–42, 1997.
- [2] M. N. González Delgado, C. Orozco Barrenetxea, A. Pérez Serrano, J. M. Alfayate Blanco, and F. Rodríguez Vidal, *Contaminación ambiental. Una visión desde la química.*, no. 31. Madrid: Ediciones Paraninfo S. A., 2002.
- [3] M. T. Moreno, R. Rodríguez-Amaro, J. M. Rodríguez Mellado, M. Mayén, and F. Jiménez Guardado, "Imidazolinone and triazine herbicides in soils in relation to the complexes formed with Cu(II) ions," *Comptes Rendus Chim.*, vol. 21, no. 9, pp. 884–889, 2018.
- [4] X. Huang *et al.*, "Microbial catabolism of chemical herbicides: Microbial resources, metabolic pathways and catabolic genes," *Pestic. Biochem. Physiol.*, vol. 143, pp. 272–297, 2017.
- [5] P. Janaki, N. Sharma, C. Chinnusamy, N. Sakthivel, and C. Nithya, "Herbicide residues and their management strategies," *Indian J. Weed Sci.*, vol. 47, no. 3, pp. 329–344, 2015.
- [6] H. F. Gutiérrez and M. C. Arregui, "Comportamiento de herbicidas en suelos, aguas y plantas," *FAVE*, vol. 14, p. 17, 2005.
- [7] J. B. Weber, G. G. Wilkerson, and C. F. Reinhardt, "Calculating pesticide sorption coefficients (K_d) using selected soil properties," *Chemosphere*, vol. 55, no. 2, pp. 157–166, 2004.
- [8] K. Mendes, K. Hall, K. Spokas, W. Koskinen, and V. Tornisielo, "Evaluating agricultural management effects on Alachlor availability: tillage, green manure and biochar," *Agronomy*, vol. 7, no. 4, p. 64, 2017.
- [9] R. A. Torres, R. Mosteo, C. Pétrier, and C. Pulgarin, "Experimental design approach to the optimization of ultrasonic degradation of alachlor and enhancement of treated water biodegradability," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 16, no. 3, pp. 425–430, 2009.
- [10] V. Pot, P. Benoit, M. Le Menn, O. M. Eklo, T. Sveistrup, and J. Kværner, "Metribuzin transport in undisturbed soil cores under controlled water potential conditions: experiments and modelling to evaluate the risk of leaching in a sandy

- loam soil profile," *Pest Manag. Sci.*, vol. 67, no. 4, pp. 397–407, 2011.
- [11] B. Bethi, S. H. Sonawane, B. A. Bhanvase, and S. P. Gurfekar, "Nanomaterials-based advanced oxidation processes for wastewater treatment: A review," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 109, pp. 178–189, 2016.
- [12] J. C. Caseley, "Capítulo 10: Herbicida," *Food and Agricultura Organization of the United Nations*. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/t1147s0e.htm>.
- [13] "Paraquat y Diquat," *Environmental Protection Agency*. [Online]. Available: <https://espanol.epa.gov/sites/production-es/files/2015-09/documents/spch12.pdf>.
- [14] M. Fernández-Marcos, "Contaminación por fósforo procedente de la fertilización orgánica de suelos agrícolas," *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*, no. May, pp. 25–31, 2011.
- [15] P. J. A. Withers, J. J. Elser, J. Hilton, H. Ohtake, W. J. Schipper, and K. C. Van Dijk, "Greening the global phosphorus cycle: How green chemistry can help achieve planetary P sustainability," *Green Chem.*, vol. 17, no. 4, pp. 2087–2099, 2015.
- [16] N. W. Shappell, "Estrogenic activity in the environment: municipal wastewater effluent, river, ponds, and wetlands," *J. Environ. Qual.*, vol. 35, no. 1, p. 122, 2006.
- [17] J. L. Costa, H. Massone, D. Martínez, E. E. Suero, C. M. Vidal, and F. Bedmar, "Nitrate contamination of a rural aquifer and accumulation in the unsaturated zone," *Agric. Water Manag.*, vol. 57, no. 1, pp. 33–47, 2002.
- [18] H. Tunney, P. Csathó, and P. Ehlert, "Approaches to calculating P balance at the field-scale in Europe," *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, vol. 166, no. 4, pp. 438–446, 2003.
- [19] Z. Li, Z. Ma, T. J. van der Kuijp, Z. Yuan, and L. Huang, "A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment," *Sci. Total Environ.*, vol. 468–469, pp. 843–853, 2014.
- [20] E. van der Pol, E. Vaessen, R. Weusthuis, and G. Eggink, "Identifying inhibitory effects of lignocellulosic by-products on growth of lactic acid producing micro-organisms using a rapid small-scale screening method," *Bioresour. Technol.*, vol. 209, pp. 297–304, 2016.
- [21] M. Jaishankar, T. Tseten, N. Anbalagan, B. B. Mathew, and K. N. Beeregowda, "Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals," *Interdiscip. Toxicol.*, vol. 7, no. 2, pp. 60–72, 2014.
- [22] Y. Yi, Z. Yang, and S. Zhang, "Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin," *Environ. Pollut.*, vol. 159, no. 10, pp. 2575–2585, 2011.
- [23] A. Singh and S. M. Prasad, "Remediation of heavy metal contaminated ecosystem: an overview on technology advancement," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 353–366, 2015.
- [24] G. Chauhan, K. K. Pant, and K. D. P. Nigam, "Chelation technology: A promising green approach for resource management and waste minimization," *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 17, no. 1, pp. 12–40, 2015.
- [25] A. T. Jan, M. Azam, K. Siddiqui, A. Ali, I. Choi, and Q. M. R. Haq, "Heavy metals and human health: Mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 16, no. 12, pp. 29592–29630, 2015.
- [26] M. A. Barakat, "New trends in removing heavy metals from industrial wastewater," *Arab. J. Chem.*, vol. 4, no. 4, pp. 361–377, 2011.
- [27] H. S. Kim, Y. J. Kim, and Y. R. Seo, "An overview of carcinogenic heavy metal: molecular toxicity mechanism and prevention," *J. Cancer Prev.*, vol. 20, no. 4, pp. 232–240, 2015.
- [28] P. Jadhao, G. Chauhan, K. K. Pant, and K. D. P. Nigam, "Greener approach for the extraction of copper metal from electronic waste," *Waste Manag.*, vol. 57, pp. 102–112, 2016.
- [29] J. Cui and L. Zhang, "Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 158, no. 2–3, pp. 228–256, 2008.
- [30] J. Loaysa, M. Silva, G. Arce, and A. Casafranca, "Gestión integral de residuos de bifenilos policlorados - PCB (Aspectos generales y ciclo de vida)," *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, vol. 18, no. 2, pp. 31–39, 2015.
- [31] I. Agote, "Bifenilos policlorados (PCBs): Un panorama acerca de sus usos, existencias, riesgos, almacenamiento y tratamientos," p. 2011, 2011.
- [32] O. Faroon, L. Samuel, C. Smith-Simon, and C. De Rosa, "Polychlorinated biphenyls: human health aspects," Geneva, 2003.
- [33] P. S. Ross, G. M. Ellis, M. G. Ikonomou, and R. F. Addison, "High PCB concentrations in free-ranging pacific killer whales, *Orcinus orca*: effects of age, sex and dietary preference," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 40, no. 6, pp. 504–515, 2000.
- [34] A. J. Jamieson, T. Malkocs, S. B. Piertney, T. Fujii, and Z. Zhang, "Bioaccumulation of persistent organic pollutants in the deepest ocean fauna," *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 1, no. 3, pp. 24–27, 2017.
- [35] D. B. Miklos, C. Remy, M. Jekel, K. G. Linden, J. E. Drewes, and U. Hübner, "Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review," *Water Res.*, vol. 139, pp. 118–131, 2018.
- [36] C. Guarín, J. Avendaño, B. Bellozo, J. Carvajal, and A. Mera, "Fotocatálisis heterogénea para el tratamiento de desechos líquidos utilizando dióxido de titanio E-171 y Degussa P-25," *RE TAKVV*, vol. 1, pp. 33–43, 2008.



Rosario Elena Armijo Miranda recibió el título de Biología por la Universidad de Sevilla en el 2018. Actualmente se encuentra cursando el máster en Biotecnología Ambiental, Industrial y Alimentaria en la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla).



Nathalia Vanini Basegio Castellani recibió el título de Ingeniera Química en el 2015 y de Ingeniera de Alimentos en el 2017, ambos por la Universidad Nacional de Asunción (Paraguay). Recibió el título de Especialista en Didáctica Universitaria en el 2018 por la Universidad Nacional del Este (Paraguay). Actualmente se encuentra cursando el máster en Biotecnología Ambiental, Industrial y Alimentaria en la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla). Entre el 2014 y 2016 se ha

desempeñado en el sector de Control de Calidad de una industria alimentaria como Supervisora de Microbiología. Desde el 2016 se desempeña en una empresa del sector de productos fitosanitarios donde es responsable por la obtención de registros de productos ante el Ministerio de Agricultura en Paraguay.



Brinidilda Dolores Cofrade Romero recibió el título de Grado en Química por la Universidad de Sevilla en el 2017. Desde 2012 a 2013 fue alumna interina en el Departamento de Química Analítica en la Universidad de Sevilla. Durante el curso 2013-2014 realizó un intercambio SICUE a la Universidad de La Laguna. En 2015 ejerció de técnico de laboratorio en Chávez y Clark S. L., y durante el 2016 como adjunto al encargado de calidad en Destilaciones Bordas S. A. En 2017 realizó un

estudio de reducción de gases invernaderos. Actualmente se encuentra cursando el máster en Biotecnología Ambiental, Industrial y Alimentaria en la Universidad Pablo de Olavide.



Teresa Ramos Carreño recibió el título en Ciencias del Mar por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria en el 2018. Durante la carrera ha cursado un año de Erasmus en la Universidad de Southampton en el National Oceanography Center (Inglaterra). Actualmente se encuentra cursando el máster en Biotecnología Ambiental, Industrial y Alimentaria en la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla). Ha realizado prácticas externas en el Laboratorio del Grupo de Tecnología Química y

Desarrollo Sostenible del iUNAT (Departamento de Química de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria).

Microclima: evaluación en el contexto de la conservación del Patrimonio Histórico

Silvia Diez-Fernández

Resumen— Las estrategias de intervención de una obra de interés histórico requieren de la evaluación de los factores macro y microclimáticos para determinar los procesos de deterioro a los que se ve sometida. De entre esos factores, dos de los más relevantes son la humedad relativa y la temperatura, ya que se ven directamente afectados por la afluencia de visitantes y, además, influyen en el deterioro asociado a la microflora. Por otra parte, un adecuado diseño de la macroflora puede favorecer la regulación de dichos parámetros en el caso de obras expuestas al exterior. En este sentido, el uso de programas de simulación que permitan particularizar cada caso de estudio y hacer predicciones, se plantea como una interesante opción para determinar la adecuación de las estrategias de intervención propuestas.

Palabras Claves— Biodeterioro, Conservación, Microclima, Patrimonio Histórico, Turismo.



1. INTRODUCCIÓN: MACROCLIMA Y MICROCLIMA

A la hora de llevar a cabo un plan de acción para la conservación o restauración de una obra o conjunto de interés histórico, uno de los puntos más relevantes es el estudio de los factores ambientales que afectan al bien. Los factores relacionados con las condiciones climáticas tienen mucha relevancia en los procesos de degradación a los que están expuestas las obras, aumentando la peligrosidad y, por tanto, el riesgo al que están sometidos [1], [2]. Como ejemplo, se puede nombrar la aparición de agentes de alteración biológica relacionada con las condiciones de temperatura y humedad relativa (HR), ya que favorecen el crecimiento de microflora (cianobacterias, algas verdes, etc.). Otro ejemplo muy dañino es la aparición fisuras o desprendimientos del material pétreo asociadas a la cristalización de sales debido a ciclos de hielo-deshielo. Por este motivo, es importante llevar a cabo un estudio adecuado que permita determinar el daño existente y si existe necesidad de llevar a cabo intervenciones y a qué nivel.

Dentro de las condiciones climáticas se puede distinguir entre dos tipos, las macroclimáticas y las microclimáticas. Las primeras hacen referencia al clima de la zona donde se encuentra el objeto de interés, es decir, hacen referencia a parámetros como la temperatura media o la amplitud térmica, horas de insolación, precipitaciones, viento, etc., así como a los niveles de contaminación de la zona. Por otro lado, las condiciones microclimáticas se refieren a la situación en el entorno más inmediato de la obra, incluyendo las macroclimáticas, pero teniendo en cuenta las variaciones particulares que puedan darse sobre ellas, por ejemplo, por variaciones puntuales del terreno en caso de un conjunto u obra abierta al exterior, por la presencia de macroflora que modifique la cantidad de radiación recibida por una fachada, o porque el bien de interés se mantenga en un entorno controlado en el interior de un edifi-

cio o en una vitrina.

2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS MACRO Y MICROCLIMÁTICOS

Como se ha adelantado, para poder hacer un análisis de las causas del deterioro de una obra, para poder evaluar el riesgo al que está sometida y para poder establecer un plan de acción ya sea de restauración o de medidas de prevención, es necesario determinar la relación entre los diferentes factores y el estado de dicha obra, así como el grado de relevancia de cada uno de ellos.

En primer lugar, es necesario tener un registro de las condiciones macroclimáticas que rigen el área que afecta a la obra. Los factores más importantes son el viento, la temperatura, la HR, la radiación solar y las precipitaciones. Aunque es posible recurrir a bases de datos tales como el Banco Nacional de Datos Climatológicos [3] para obtener dicha información, si es posible, es recomendable el registro *in situ*, ya que pueden existir variaciones de las condiciones entre el lugar de estudio y la localización de las estaciones meteorológicas. Este registro ha de realizarse durante periodos de tiempo que sean representativos (p.ej. un año), teniendo en cuenta los ciclos día-noche y la estacionalidad.

Respecto a las condiciones microclimáticas, los parámetros más importantes son la temperatura y la HR, que pueden registrarse en un único punto o a diferentes niveles si se considera que pueda haber variaciones relevantes (p.ej. a diferentes alturas en el interior de un edificio).

Finalmente, se toma registro de los parámetros referentes a la contaminación: análisis de calidad de aguas (condensación, subsuelo, lluvia, etc.), análisis de gases, partículas en suspensión o sedimentables, etc.

Los sensores que se utilizan en cada caso dependen tanto de la localización y la estructura de la obra como del tipo de material, además de, obviamente, los costes. El

lugar de colocación es muy importante y debe hacerse eliminando la posible influencia de otros elementos externos, ya que una mala elección puede llevar a un falseamiento de los datos, como situar un pluviómetro (recogida de precipitaciones) bajo una cornisa. En la figura 1, se muestra un pluviómetro y, como se puede observar, está colocado de tal manera que no existen elementos que alteren el muestreo.

Respecto al registro de los datos, hoy en día existen sensores y sistemas de microprocesamiento que permiten recoger la información de forma sistemática con cierta periodicidad y almacenarla, como los Delta-T-logger [4].



Fig. 1. Pluviómetro para el registro de precipitaciones [5].

Sin embargo, la determinación de todos estos elementos no es requerida en todos los casos. Es necesario llevar a cabo una evaluación general de la obra y su entorno para determinar qué factores pueden ser los más relevantes respecto a su alteración y su conservación en función de su localización, sus características y su naturaleza. De esta forma se optimiza el proceso. Dado que no existe un procedimiento general que sea aplicable en todos los casos de estudio, en el apartado siguiente se analizará el modo de evaluación en algunos trabajos reales recientes.

3. RESULTADOS: EVALUACIÓN DE CASOS PRÁCTICOS

Ya sea en el interior o en el exterior de la obra o conjunto, la gran parte de los trabajos se basan en el estudio de las condiciones inmediatas y específicas que afectan a su conservación. Es por ello que los casos que se comentarán en este apartado serán referidos a la evaluación de los estudios microclimáticos.

Como ya se ha comentado, la HR y la temperatura son dos de los parámetros más relevantes en el estudio de los microclimas. Uno de los factores externos con mayor poder sobre estos dos parámetros, especialmente cuando el bien de interés está (o estaba) en gran medida aislado del exterior, es el turismo. Este es el caso de las catacumbas, o las cuevas [6], [7], [8]. En este contexto, Šebela y Turk [9] realizan un estudio sobre el impacto del turismo en la variación relativa de las temperaturas del aire y las aguas subterráneas en la cueva de Postojna en Eslovenia (figura 2). Se tomaron medidas de las temperaturas del aire y del agua de las piscinas interiores, y la temperatura exterior

en el bosque sobre la cueva. Las temperaturas fueron registradas cada hora, y las precipitaciones cada 0,2 mm (registro del tiempo). Los valores de ambos parámetros fueron recogidos con sensores acoplados a un microprocesador data-logger. También hubo un registro del número de visitantes. Los estudios mostraron que el principal foco de atención debe ser el agua de las piscinas naturales de su interior, especialmente en invierno, ya se determinó una relación directa entre el incremento de la temperatura del agua y la presencia de turistas. Por otra parte, la buena ventilación dentro ha impedido que haya un mayor desarrollo de microflora y el consecuente biodeterioro asociado, aunque no recomiendan aumentar el número de visitantes.

También Pla *et al.* [10] investigaron situaciones similares, en concreto la relación entre los parámetros microclimáticos, el comportamiento de gases a nivel de traza (CO_2 y ^{222}Rn) y la afluencia de visitantes en la Cueva de Rull en Alicante (España). Para ello monitorizaron tanto el interior como el exterior de la cueva. En el interior se puso una estación de monitorización microambiental acoplada a un microprocesador igual que en el caso anterior. Se monitorizaron la temperatura del aire, la HR, la presión atmosférica y las concentraciones de CO_2 y Rn. En el exterior se situó una estación meteorológica con otro microprocesador independiente para la HR, precipitaciones y viento (dirección y velocidad). En ambos casos, el tiempo de muestreo fue de 14 meses con registro de datos cada de 15 minutos. El análisis de los datos permitió establecer un patrón estacional entre la concentración de gases y la ventilación de la cueva, siendo el principal factor que gobierna su microclima las diferencias entre las temperaturas y densidad del aire exterior e interior. El patrón estacional (temporada alta y temporada baja) también permitió establecer una relación directa entre el flujo de visitantes y el nivel de CO_2 en el interior de la cueva.



Fig. 2. Grupo de turistas en la cueva de Postojna [11].

Con el desarrollo tecnológico, aparecen nuevas y más eficientes maneras, no solo de llevar a cabo el estudio de las condiciones climáticas, sino también de evaluar la calidad de las propuestas para su mejora en relación al bien o bienes de interés. Un ejemplo es el estudio llevado a cabo por Balocco *et al.* [12]. Dos de los factores que más afectan al deterioro de materiales celulósicos son la temperatura del aire y la HR, ya que estos parámetros están

relacionados con el desarrollo de microflora. En este trabajo se lleva a cabo una comparación entre la situación real microclimática de un archivo histórico (Biblioteca Palatina, Parma, Italia) y una simulación que representaría las condiciones del lugar si se instalara un sistema HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning* o *Calefacción, ventilación y aire acondicionado*). Este sistema de climatización permitiría reducir las variaciones en los parámetros termo-físicos y controlar el biodeterioro. Para ello, previamente se habían evaluado las condiciones microclimáticas del archivo [13]. Las medidas se llevaron a cabo en julio y diciembre, considerando las variaciones debidas a la estacionalidad. Se monitorizaron cada dos minutos temperatura y velocidad del aire, HR (a 3 alturas) y variaciones de presión utilizando anemómetros, medidores de temperatura y humedad relativa, y medidores de presión. Los datos fueron procesados por un sistema data-logger. Además, se llevó a cabo un estudio termográfico de varias superficies de la biblioteca, y un análisis de la concentración en aire (succión) y de deposición de microorganismos [13]. Todos estos parámetros, así como la situación de ventanas, puertas, volumen total, visitantes, etc., fueron tenidos en cuenta para el desarrollo del modelo. El modelo desarrollado, con el posterior procesamiento de datos, tiene la ventaja de que puede ser aplicado en otros casos similares, permitiendo evaluar de una forma efectiva la adecuación de sistemas de control de las condiciones de conservación.

Habitualmente se asocian los agentes biológicos únicamente con el biodeterioro, pero como se comenta en la introducción, la macroflora puede tener otro tipo de impacto en la conservación de restos arqueológicos. El potencial papel protector de la vegetación en enclaves históricos ha sido, de hecho, descrito [14], [15]. Precisamente, Fabbri *et al.* [16] llevan a cabo en un estudio la relación entre las condiciones microclimáticas en el exterior de una villa romana (Russi, Italia) y la vegetación presente para valorar las estrategias de conservación. Al igual que en caso anterior, utilizan un programa para modelizar la configuración arbórea y comparar la situación microclimática real con simulaciones de ausencia de árboles, y con la presencia de mayor heterogeneidad de especies. Además, pretenden ir un paso más allá, evaluando la percepción de confort de los turistas respecto a dicha configuración. Los factores considerados respecto al microclima son la temperatura del aire, la HR, y la velocidad del viento. Sin embargo, aunque los propios autores declaran la efectividad de la metodología propuesta, también remarcan las deficiencias en su estudio y plantean la necesidad de incrementar el número de parámetros considerados, tales como el follaje, la calidad de la sombra, la evapotranspiración, o factores relativos a las ruinas como la variación de las propiedades termo-físicas de la piedra. Ampliar el número de factores aumenta sin duda la complejidad del tratamiento de datos, pero permitiría grandes avances en el desarrollo de estrategias de conservación del Patrimonio.

4. CONCLUSIONES

Los procesos de degradación y alteración de una obra son el resultado de la interacción entre muy diversos factores, por tanto, el desarrollo de un plan de evaluación de riesgos debe de tener en cuenta que cada caso es particular. Una buena metodología de evaluación de los factores macro y microclimáticos debe ser coherente con las particularidades de cada caso en base a una economía de tiempo y de gasto, siempre teniendo en cuenta la representatividad de los datos obtenido respecto a colocación de sensores y tiempo de muestreo.

Por otra parte, los mismos elementos climáticos pueden afectar de forma diferente a los diferentes bienes del patrimonio. Por ello, los estudios deben considerar tanto el estado de conservación como toda la información que pueda aportar la historia y eventos relativos al bien, de la misma forma que se consideran los factores climáticos.

Por último, se observa una tendencia al uso de programas de simulación que permitirían predecir y optimizar las acciones de conservación y explotación de los bienes. Sin embargo, tener en cuenta todos los factores implicados es complejo, aunque los autores se muestran optimistas respecto a su mayor desarrollo en un futuro cercano.

REFERENCIAS

- [1] F. Karaca, "An AHP-based indoor air pollution risk index method for cultural heritage collections," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 16, pp. 352-360, May/June 2015, doi: 10.1016/j.culher.2014.06.012.
- [2] M. Andretta, F. Coppola, and L. Seccia, "Investigation of the interaction between the outdoor environment and the indoor microclimate of a historical library", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 17, pp. 75-86, Jan/Feb 2016, doi: 10.1016/j.culher.2015.07.002.
- [3] Web de la Agencia Estatal de Meteorología. http://www.aemet.es/es/idi/clima/registros_climaticos.
- [4] Web de Delta-T-devices. <https://www.delta-t.co.uk/product-category/data-loggers/>.
- [5] Web de Flickr. User: Acronet Paradigm. <https://www.flickr.com/photos/acronetparadigm/16263630897/in/photostream/>.
- [6] C. Urzi, B. De Leo, and P. Albertano, "Microbial diversity in Paleolithic Caves: a study case on the phototrophic biofilms of the cave of bats (Zuheros, Spain)," *Microbial Ecology*, vol. 60, no. 1, pp. 116-129, July 2010, doi: 10.1007/s00248 0109710x.
- [7] S. Sánchez-Moral, J.C. Cañaveras, D. Benavente, A. Fernández-Cortes, S. Cuezva, J. Elez, V. Jurado, M.A. Rogerio-Candelera, and C. Saiz-Jiménez, "A study in the state of conservation of the Roman Necropolis of Carmona (Sevilla, Spain)," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 34, pp. 185-197, Nov/Dec 2018, doi: 10.1016/j.culher.2018.02.019.
- [8] L. Bruno, L. Rugini, V. Spizzichino, L. Caneve, A. Canini, and N.T.W. Ellwood, "Biodeterioration of Roman hypogea: the case study of the Catacombs of SS. Marcellino and Pietro (Rome, Italy)," *Annals of Microbiology*, pp. 1-10, Feb 2019, doi: 10.1007/s13213 019 01460z.
- [9] S. Šebela, and J. Turk, "Natural and anthropogenic influences

- on the year-round temperature dynamics of air and water in Postojna show cave, Slovenia," *Tourism Management*, vol. 40, pp. 233-243, doi: 10.1016/j.tourman.2013.06.011.
- [10] C. Pla, J.J. Galiana-Merino, J. Cuevas-González, J.M. Andreu, J. C. Cañaveras, S. A. Fernández-Cortés, E. García-Antón, S. Sánchez-Moral, and D. Benavente, "Definition of Microclimatic Conditions in a Karst Cavity: Rull Cave (Alicante, Spain)," *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems-Environmental Earth Sciences vol. 1*, B. Andreo, F. Carrasco, J. Durán, P. Jiménez and J. LaMoreaux, eds., Berlin: Springer-Verlag, pp. 497-503, 2014, doi: 10.1007/978-3-642-17435-3_56.
- [11] Web de Flickr. User: Shadowgate. <https://www.flickr.com/photos/shadowgate/18151662488/>.
- [12] C. Balocco, G. Petrone, O. Maggi, G. Pasquariello, R. Albertini, and C. Pasquarella, "Indoor microclimatic study for Cultural Heritage protection and preventive conservation in the Palatina Library," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 22, pp. 956-967, Nov/Dec 2016, doi: 10.1016/j.culher.2016.05.009.
- [13] C. Pasquarella, C. Balocco, G. Pasquariello, G. Petrone, E. Saccani, P. Manotti, M. Ugolotti, F. Palla, O. Maggi, and R. Albertini, "A multidisciplinary approach to the study of cultural heritage environments: experience at the Palatina library in Parma," *Science of the Total Environment*, vol. 536, pp. 557-567, Dec 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.105.
- [14] G. Caneva, "A botanical approach to the planning of archaeological parks in Italy," *Conservation and management of archaeological sites*, vol. 3, no. 3, pp. 127-134, 1997, doi: 10.1179/135050399793138590.
- [15] G. Carcangiu, M. Casti, G. Desogus, P. Meloni, and R. Ricciu, "Microclimatic monitoring of a semi-confined archaeological site affected by salt crystallisation," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 16, no. 1, pp. 113-118, Jan/Feb 2015, doi: 10.1016/j.culher.2014.02.001.
- [16] K. Fabbri, G. Canuti, and A. Ugolini, "A methodology to evaluate outdoor microclimate of the archaeological site and vegetation role: a case study of the Roman Villa in Russi (Italy)," *Sustainable Cities and Society*, vol. 35, pp. 107-133, Nov 2017, doi: 10.1016/j.scs.2017.07.020.



Silvia Diez-Fernández se licenció en 2010 en Biología por la Universidad de Oviedo, obteniendo el grado de Doctor en Química en 2017 en la misma Universidad. Desde entonces y hasta finales de 2018, trabajó como investigadora postdoctoral en el Comisariado de Energía Atómica en París (CEA-Saclay). Actualmente es alumna del Máster Diagnóstico del Estado de Conservación del Patrimonio Histórico en la Universidad Pablo de Olavide.