

DE DESIERTO NUCLEAR A LABORATORIO EVOLUTIVO

Respuestas de los organismos vivos frente a la radiación ionizante en Chernóbil

GERMÁN ORIZAOLA

El accidente ocurrido en 1986 en la central nuclear de Chernóbil (Ucrania) causó la mayor liberación de material radiactivo debida a la actividad humana. Las previsiones iniciales consideraron que la zona afectada por la contaminación radiactiva quedaría desprovista de vida durante milenios. Tres décadas después, la biodiversidad de la zona se ha recuperado completamente y en Chernóbil viven todos los grandes mamíferos del este de Europa y más de 200 especies de aves. Los mecanismos que permiten a los organismos vivir en esta zona son todavía objeto de estudio y controversia. En la actualidad no existe consenso científico sobre el impacto a medio o largo plazo de la radiación sobre la naturaleza de la zona. La investigación en Chernóbil es básica para entender los efectos de la contaminación radiactiva sobre la biodiversidad, además de constituir un excelente laboratorio natural para el estudio de procesos ecoevolutivos en respuesta a la actividad humana.

Palabras clave: ecología, evolución, adaptación, mutación, radiactividad, Chernóbil.

Vivimos rodeados de radiactividad. Esta radiactividad procede fundamentalmente de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra y de elementos radiactivos naturales contenidos en la corteza terrestre. Además de la radiactividad natural, los organismos vivos podemos estar expuestos a radiactividad de origen artificial, generada por la actividad humana. La radiactividad artificial se produce, entre otros motivos, para utilizarla en pruebas médicas, para la producción de armamento o en procesos de generación de energía en centrales nucleares. Accidentes como los ocurridos en las centrales nucleares de Chernóbil (Ucrania) en 1986 y de Fukushima (Japón) en 2011 representan los casos más notables de liberación de materiales radiactivos al medio ambiente a consecuencia de la acción humana.

■ EL ACCIDENTE NUCLEAR DE CHERNÓBIL

El 26 de abril de 1986, a la 1.23 h, el reactor número 4 de la central nuclear de Chernóbil explotó durante unas pruebas técnicas de seguridad. Fallos en el diseño del re-

actor y en la manipulación de este condujeron a un sobrecalentamiento del núcleo que provocó una explosión que destruyó la cubierta protectora del reactor. Durante el accidente se produjeron varios incendios, fundamentalmente en las barras de grafito del reactor, que estuvieron activos durante nueve días y que causaron la dispersión de enormes cantidades de material radiactivo. Se estima que durante el accidente se liberó al ambiente una cantidad de radiación equivalente a 400 veces la liberada por la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima (Japón) en 1945. Este ha sido, sin duda, el mayor accidente nuclear de la historia.

Inmediatamente después del accidente comenzaron las labores de contención y limpieza. Se evacuó a todos los residentes en un radio de unos 30 km alrededor de la central nuclear. En total, en sucesivas operaciones, unas 350.000 personas fueron evacuadas de zonas cercanas a la central en Ucrania y Bielorrusia. A consecuencia del accidente, se creó una zona de exclusión de acceso restringido de unos 4.700 km², en la que se prohibió el asentamiento humano permanente. Esas condiciones se siguen manteniendo en la actualidad.

«A consecuencia del accidente de Chernóbil, se creó una zona de exclusión de unos 4.700 km², en la que se prohibió el asentamiento humano permanente»

El impacto inicial del accidente sobre la naturaleza de la zona fue severo en aquellas áreas que recibieron las dosis de radiación más altas. Este impacto de la fase aguda del accidente fue especialmente notable en una zona de pinar adyacente a la central nuclear. En esa zona los pinos murieron al instante y todas las acículas se volvieron rojas, lo que dio a toda la zona el aspecto por el que se la conoce desde entonces, el Bosque Rojo (Red Forest). No obstante, en otras áreas de la Zona de Exclusión los niveles de radiación a los que estuvieron expuestas plantas y animales fueron mucho más bajos.

La idea general en el momento del accidente era que la zona afectada iba a quedar desprovista de vida durante cientos, e incluso miles de años. Chernóbil iba a convertirse en un desierto nuclear inhabitable. Esta visión se basaba en la larga vida media de algunos de los isótopos radiactivos liberados durante el accidente, como los isótopos de plutonio-239, con una vida media de unos 24.000 años.

En la actualidad, 33 años después del accidente, la Zona de Exclusión de Chernóbil acoge poblaciones de todas las especies de grandes mamíferos del este de Europa (oso pardo, lobo, lince europeo, caballo de Przewalski, alce, castor, nutria...) y más de 200 especies de aves, entre otras muchas especies. La superficie de bosque se ha extendido hasta ocupar amplias áreas antes usadas para la agricultura. La zona está claramente muy lejos de ser un desierto nuclear. Esta contradicción plantea preguntas científicas de gran interés: ¿Cómo es posible que todos esos organismos vivan en Chernóbil? ¿Cuáles son los mecanismos que les permiten mantenerse en una zona contaminada por material radiactivo como Chernóbil?

■ LA CONTAMINACIÓN RADIATIVA EN CHERNÓBIL

Para entender los efectos sobre el medio ambiente de un accidente nuclear como el de Chernóbil, es preciso conocer, en primer lugar, la diferente naturaleza de los isótopos radiactivos liberados y su distribución en el medio ambiente. Un primer aspecto importante es el tipo de sustancias radiactivas liberadas al entorno. Uno de los isótopos más abundantes inmediatamente después de la explosión fue el isótopo de yodo-131, generador de radiación beta de alta energía, con gran potencial carcinogénico (especialmente ligado al cáncer de tiroides), pero con una vida



German Chizola

El 26 de abril de 1986, el reactor número 4 de la central nuclear de Chernóbil explotó en plena madrugada durante unas pruebas técnicas de seguridad. Se estima que durante el accidente se liberó al ambiente una cantidad de radiación equivalente a 400 veces la liberada por la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima (Japón) en 1945. A consecuencia del accidente se creó una zona de exclusión de acceso restringido de unos 4.700 km², en la que se prohibió el asentamiento humano permanente. Esas condiciones se siguen manteniendo en la actualidad. En la imagen, vista del reactor 4 de Chernóbil en septiembre de 2016.

«La idea general en el momento del accidente era que la zona afectada iba a quedar desprovista de vida durante cientos, e incluso miles de años»

media muy corta, de solo ocho días. Es decir, escasas semanas después del accidente estos isótopos habían desaparecido de la zona. Los isótopos cuya vida media se cifra en miles de años, como el plutonio-239, generan una radiación alfa de baja energía, con escasa capacidad de penetración (esto es, son parados por la piel), y por tanto son poco peligrosos por irradiación externa. En la actualidad, las principales fuentes

de contaminación se deben a isótopos de cesio-137 y estroncio-90. Estos isótopos son emisores de radiación gamma de energía media y partículas beta de alta energía, tienen mayor capacidad de penetración y una vida media de unos treinta años. Es decir, la mitad de todos los compuestos de este tipo generados durante el accidente nuclear ya se habrían desintegrado y desaparecido del ambiente.

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta en Chernóbil, y que se olvida con mucha frecuencia, es cómo se distribuye la contaminación radiactiva en el paisaje. En la actualidad, solo un pequeño porcentaje de la Zona de Exclusión mantiene niveles altos de radiactividad (cerca de un 30%). Incluso, dentro de estas zonas los niveles de radiación pueden variar en varios órdenes de magnitud en una escala de escasos metros. Esta distribución tan parcheada de la contaminación radiactiva hace que la gran mayoría de organismos no esté constantemente expuesta a niveles altos de radiación.





German Orizaba

La contaminación radiactiva se distribuye de manera desigual en el paisaje de Chernóbil. En la actualidad, solo un pequeño porcentaje de la Zona de Exclusión mantiene niveles altos de radiactividad, e incluso dentro de esta zona los niveles de radiación varían. En la imagen, el lago Hluboke, una de las zonas con mayor contaminación de la Zona de Exclusión de Chernóbil.

■ EFECTOS DE LA RADIACIÓN SOBRE LOS ORGANISMOS

La radiación ionizante, como la generada en el accidente nuclear de Chernóbil, puede causar daños en las células de los organismos. El daño celular se genera cuando las partículas radiactivas impactan con moléculas orgánicas, en particular con el ADN. Estas interacciones con el ADN pueden ser directas o indirectas. El ADN de las células puede verse afectado de manera directa por la radiación ionizante cuando partículas de radiación alfa o beta inciden físicamente sobre las hebras de ADN y provocan su rotura, simple o doble. Otra alternativa es que el ADN se vea afectado de manera indirecta, lo que ocurre cuando las partículas radiactivas inciden sobre moléculas de agua y otras moléculas orgánicas y crean radicales libres que pueden reaccionar con el ADN y generar a su vez daños estructurales.

Los efectos causados por estos daños en el ADN son muy diversos. El nivel de daño depende de que este sea o no detectado y reparado por la maquinaria de reparación celular. La reparación puede funcionar sin fallos y por tanto sin que se genere ningún efecto, pero puede también funcionar de forma imperfecta y generar mutaciones. En este segundo caso, los cambios producidos en la secuencia de nucleótidos pueden ser sinónimos (alteraciones

en la secuencia de ADN sin que se produzca un cambio en el aminoácido producido) y por tanto no generar efectos funcionales, o cambios no sinónimos que modifican la secuencia de aminoácidos y sí pueden alterar la estructura y función de los genes. La acumulación de mutaciones no sinónimas en cualquier organismo está asociada a cambios en el metabolismo y la proliferación celular, así como a alteraciones en la expresión génica, procesos de senescencia celular o al desarrollo de respuestas cancerígenas. Si los daños son abundantes o no son corregidos, pueden afectar al mantenimiento y replicación de las células, alterar su funcionamiento e incluso generar la muerte celular. Si un número alto de células de un organismo muere, se puede llegar a producir la muerte de ese individuo.

Un aspecto que pocas veces se tiene en cuenta, y que tiene una gran relevancia evolutiva, es que, dada la alta tasa de generación de mutaciones aleatorias producidas por la radiación ionizante, esta contribuye también a incrementar la variabilidad genética a escala poblacional a un ritmo mucho más elevado de lo habitual. Este aumento rápido de la variabilidad genética, combinado con la presencia de un agente selectivo tan potente como la radiación, debería favorecer la aparición de procesos intensos de selección natural. Además, puede generar la aparición de mutaciones beneficiosas, de carácter adaptativo, que permitan a un organismo hacer frente a ambientes con contaminación radiactiva. En este sentido, la radiación puede estar ayudando a generar precisamente la diversidad genómica necesaria para hacer frente a la radiación, y algunos estudios han sugerido la posible aparición en Chernóbil de procesos de adaptación a la exposición crónica a contaminación radiactiva (Galván et al., 2014; Møller y Mousseau, 2016).

En definitiva, el número y el tipo de cambios que experimente un individuo en sus células por efecto de la radiación ionizante, así como los procesos selectivos asociados, determinarán finalmente el nivel de impacto de la radiación sobre esos organismos y sus poblaciones.

■ LA NATURALEZA DE CHERNÓBIL Y LA RADIACIÓN

Durante los primeros meses después de la explosión en la central nuclear de Chernóbil se registraron importantes efectos negativos en la fauna y vegetación de las áreas más afectadas por la contaminación radiactiva (UNSCEAR, 1996). Se registró un aumento de la tasa de mortalidad en diversos grupos de animales y plantas, así como diferentes daños morfológicos, fisiológicos y alteraciones genómicas (Yablokov, Nesterenko y Nes-

terenko, 2009). Todos estos fenómenos llevaron a una reducción de las poblaciones en las áreas expuestas a alta radiación.

Estudios posteriores, centrados fundamentalmente en aves, encontraron otros efectos negativos de la radiación a nivel individual. Por ejemplo, individuos que vivían en las zonas con mayores niveles de contaminación radiactiva presentaron alteraciones morfológicas como un incremento de leucismo (presencia de plumas blancas) o presencia de tumores, una reducción de los niveles de respuesta inmune, y diversas alteraciones reproductivas y genéticas (Møller y Mousseau, 2006). Además, otros trabajos mostraron una menor abundancia de varios grupos animales en las zonas de mayor contaminación radiactiva (Mousseau y Møller, 2014). No obstante, muchos de estos estudios han sido criticados por presentar serios problemas metodológicos y de análisis, y han generado bastante controversia en la comunidad científica (Beresford, Scott y Copplestone, 2019; Smith, 2007).

Estudios más recientes no han encontrado efectos significativos de la radiación en una amplia variedad de organismos como invertebrados acuáticos, saltamontes e incluso aves (Bonisoli-Alquati et al., 2018; Galván et al., 2014; Murphy, Nagorskaya y Smith, 2011). Especies como el oso pardo o el bisonte europeo, que no estaban presentes en Chernóbil en el momento del accidente, han recolonizado la zona. Trabajos desarrollados en la parte bielorrusa de la Zona de Exclusión (la Reserva Radioecológica de Polesia) durante 1987-1996 mostraron, además, un incremento notable de la abundancia de grandes mamíferos (alce, corzo, jabalí...) a lo largo del tiempo; la ausencia de relación entre radiactividad y abundancia de estas especies, y la presencia de una población de lobo con una densidad siete veces mayor en esa zona que en otras reservas naturales del país (Deryabina et al., 2015).

Un caso revelador de la situación actual de la naturaleza en la Zona de Exclusión de Chernóbil es el de los caballos de Przewalski. Estos caballos salvajes no estaban presentes en la zona en el momento del accidente, pero un grupo de unos treinta ejemplares fue liberado en 1998-1999 con la intención de que su actividad de alimentación sirviera para controlar la expansión del bosque hacia antiguas zonas de cultivo. Esta población se mantiene totalmente aislada dentro de la Zona de Exclusión, sin que exista la posibilidad de contacto con ningún otro caballo de la especie desde el exterior. Veinte años después de su introducción en Chernóbil, la población se ha multiplicado por cinco y unos 150 caballos de Przewalski viven en la Zona. Otro ejemplo del óptimo estado de esta población es su elevada tasa de reproducción, que alcanzó las 22 crías en 2018.



German Orizaba

Los caballos salvajes de Przewalski no estaban en la zona de Chernóbil en el momento del accidente, pero a finales de los noventa, un grupo de unos treinta ejemplares fue liberado para que mediante su alimentación controlaran la expansión del bosque. Veinte años después de ser introducidos, unos 150 caballos de Przewalski viven en la zona y tienen una tasa elevada de reproducción.



German Orizaba

El impacto inicial del accidente sobre la naturaleza de la zona fue severo en las áreas que recibieron las dosis de radiación más altas. Uno de los casos más conocidos es el del llamado Bosque Rojo, un pinar adyacente a la central nuclear. Cuando se produjo el accidente, los pinos murieron al instante y las acículas se volvieron rojas, lo que dio a toda la zona el aspecto por el que se la conoce desde entonces. En la imagen, un investigador en el Bosque Rojo de Chernóbil en mayo de 2017.



German Ortizola

German Ortizola

Aunque algunos estudios centrados en aves encontraron efectos negativos de la radiación en algunos individuos que vivían en las zonas más contaminadas (por ejemplo, una presencia más alta de plumas blancas o de tumores), investigaciones más recientes no han encontrado efectos significativos de la radiación en una amplia variedad de organismos como invertebrados acuáticos, saltamontes, e incluso aves. En la imagen de la izquierda, puesta de un carbonero común (*Parus major*), en el Bosque Rojo de Chernóbil, en mayo de 2017. Arriba, una rana de San Antonio oriental (*Hyla orientalis*) en Chernóbil, en junio de 2019.

■ EL FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN EN CHERNÓBIL

Los resultados contradictorios sobre los efectos de la radiación sobre la naturaleza de Chernóbil dejan claros varios aspectos. Uno, muy evidente, es la necesidad de continuar investigando en la Zona, aplicando nuevos métodos y técnicas de estudio, además de establecer diseños de muestreo adecuadamente planificados. Realizar estudios moleculares del genoma, epigenoma y metagenoma es imprescindible para determinar el tipo de respuestas que los organismos vivos desarrollan frente a la radiación, y así evaluar correctamente el estado actual de la biodiversidad de Chernóbil. Estas técnicas ayudarían, además, a profundizar en el estudio de posibles procesos de adaptación rápida a la exposición crónica a contaminación radiactiva.

La investigación en Chernóbil necesita también diferenciar entre efectos detectados a nivel individual y efectos que repercuten en el mantenimiento de las poblaciones. No es infrecuente encontrar efectos negativos de un determinado factor ambiental cuando se trabaja con poblaciones naturales, pero es necesario determinar el significado biológico de esos efectos. En un sistema como el de Chernóbil es aún más relevante evaluar la magnitud de esos efectos y entender si afectan o no a la capacidad reproductiva de los organismos, y por tanto al mantenimiento de las poblaciones.

«Algunos estudios han sugerido la posible aparición en Chernóbil de procesos de adaptación a la exposición crónica a contaminación radiactiva»

En este contexto, resulta imprescindible examinar la existencia de efectos de la radiación a largo plazo que no interfieran con el potencial reproductivo de los organismos. Una mayor inversión en reparación celular y mantenimiento en organismos expuestos a radiación podría interferir con otras funciones biológicas y generar efectos como una reducción de la esperanza de vida o la aceleración de la tasa de envejecimiento de los individuos. Estos efectos, no obstante, podrían permitir el mantenimiento de tasas de reproducción suficientes para que las dinámicas poblacionales no se vieran afectadas.

Otro aspecto a considerar en Chernóbil es la separación entre efectos de la radiación debidos a los niveles de contaminación alcanzados en 1986, de los que determinados sistemas no se habrían recuperado, como puede ser el caso del Bosque Rojo, y los efectos debidos a los niveles de contaminación actuales. En el caso del Bosque Rojo, considerado en muchos estudios como la referencia de zona contaminada, es necesaria mayor cautela. Esta área sigue estando bajo importante influencia humana dada su cercanía a la central nuclear, además de haber experimentado varios incendios desde 1986 y un evidente cambio de paisaje, que ha pasado de ser un pinar a ser una zona dominada por el abedul. Por tanto, es imprescindible diferenciar todos estos efectos ecológicos de los efectos causados por la radiación *per se*.



A la hora de investigar en Chernóbil, y también a la hora de comunicar los resultados de las investigaciones a la sociedad, es muy importante diferenciar claramente entre resultados que afectan a toda la Zona de Exclusión de Chernóbil y resultados que se refieren exclusivamente a las zonas más altamente contaminadas (una muy pequeña proporción del total de la Zona de Exclusión). De esa manera se podrá dar una visión realista de lo que podría estar ocurriendo a lo largo de los distintos niveles de radiación en la Zona. Esto es especialmente relevante, ya que en la actualidad amplias áreas de la Zona de Exclusión mantienen niveles de contaminación radiactiva idénticos a los niveles de radiación natural (*background radiation*) que se pueden encontrar en la mayor parte del planeta.

Chernóbil representa también un ejemplo claro de la complejidad de trabajar en escenarios de investigación en los que un factor es extraordinariamente dominante. Multitud de estudios desarrollados en Chernóbil han examinado exclusivamente el efecto de la radiación sobre la biología de los organismos vivos, obviando cualquier otro factor ambiental de relevancia, como la diversidad de hábitats, la proximidad a zonas de actividad humana, o las alteraciones que ha sufrido la zona desde 1986. Es crucial que los futuros estudios que se desarrollen en la Zona de Exclusión tengan en cuenta estos factores para así poder avanzar en el conocimiento de la situación de la biodiversidad en Chernóbil.

■ CHERNÓBIL COMO LABORATORIO NATURAL

Tres décadas después del accidente en la central nuclear de Chernóbil, un área de 4.700 km² alrededor de la central sigue siendo una zona con prohibición de asentamiento humano permanente, incluyendo la Zona de Exclusión de Chernóbil en Ucrania y la Reserva Radioecológica Estatal de Polesia en Bielorrusia. El efecto beneficioso de la ausencia de humanos en esta zona se ha sugerido como uno de los factores clave que estarían permitiendo el asentamiento de poblaciones animales diversas y abundantes, a pesar de la existencia aún de zonas contaminadas por sustancias radiactivas.

Esta ausencia de interferencia humana hace que Chernóbil constituya, desde el punto de vista científico, un laboratorio natural único en el que estudiar las respuestas ecoevolutivas de los organismos vivos frente a un factor ambiental extremo de origen antrópico como la radiación. Pero, además, resulta un sitio ideal para el estudio de procesos de sucesión ecológica, de iniciativas de renaturalización (*rewilding*), o de los efectos cascada que puede provocar el desdoblamiento humano sobre la biodiversi-



Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ CEH UK



Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ Centre for Ecology & Hydrology UK

Especies como el oso pardo (A) o el bisonte europeo (B), que no estaban presentes en Chernóbil en el momento del accidente, han recolonizado la zona. Otros mamíferos que viven allí son el alce (C), el lince europeo (D) o el lobo (E). Más de tres décadas después del accidente, la Zona de Exclusión de Chernóbil está lejos de ser un desierto nuclear. En el futuro debe garantizarse la protección de esta área por su interés para la investigación y la conservación de la biodiversidad.

«La ausencia de humanos se ha sugerido como uno de los factores clave que estarían permitiendo el asentamiento de poblaciones animales diversas y abundantes en la zona»





B

Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ CEH UK



D


Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ Centre for Ecology & Hydrology UK



E

Sergey Gaschack & TREE project, University of Salford/ Centre for Ecology & Hydrology UK

dad. Todos estos estudios pueden, además, servir de modelo para trabajos que analicen las respuestas de los organismos vivos frente a otros cambios abruptos de origen antrópico como la alteración de hábitats naturales, procesos de urbanización, o el impacto de otros contaminantes.

Considerando el interés científico y social, el futuro de Chernóbil debería garantizar la continuación de la zona como lugar preferente para la investigación y la conservación de la biodiversidad. Para ello se debería asegurar el mantenimiento de la integridad de la Zona de Exclusión como Reserva Radiológica de la Biosfera, tal y como fue declarada por el Gobierno de Ucrania en 2016. Así, una zona que se esperaba que fuese un desierto para la vida podrá preservarse como un refugio único para los seres vivos en el que poder seguir estudiando los mecanismos de respuesta frente a la acción (y a la ausencia) humana. 

REFERENCIAS

- Beresford, N. A., Scott, M., & Copplestone, D. (2019). Field effects studies in the Chernobyl Exclusion Zone: Lessons to be learnt. *Journal of Environmental Radioactivity*, en prensa (pruebas corregidas disponibles en línea). doi: [10.1016/j.jenvrad.2019.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.01.005)
- Bonisoli-Alquati, A., Ostermiller, S., Beasley, D. A. E., Welch, S. M., Møller, A. P., & Mousseau, T. A. (2018). Faster development covaries with higher DNA damage in grasshoppers (*Chorthippus albomarginatus*) from Chernobyl. *Physiological and Biochemical Zoology*, *91*(2), 776–787. doi: [10.1086/696005](https://doi.org/10.1086/696005)
- Deryabina, T. G., Kuchmel, S. V., Nagorskaya, L. L., Hinton, T. G., Beasley, J. C., Lerebours, A., & Smith, J. T. (2015). Long-term census data reveal abundant wildlife populations at Chernobyl. *Current Biology*, *25*(19), 824–826. doi: [10.1016/j.cub.2015.08.017](https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.08.017)
- Galván, I., Bonisoli-Alquati, A., Jenkinson, S., Ghanem, G., Wakamatsu, K., Mousseau, T. A., & Møller, A. P. (2014). Chronic exposure to low-dose radiation at Chernobyl favours adaptation to oxidative stress in birds. *Functional Ecology*, *28*(6), 1387–1403. doi: [10.1111/1365-2435.12283](https://doi.org/10.1111/1365-2435.12283)
- Mousseau, T. A., & Møller, A. P. (2014). Genetic and ecological studies of animals in Chernobyl and Fukushima. *Journal of Heredity*, *105*(5), 704–709. doi: [10.1093/jhered/esu040](https://doi.org/10.1093/jhered/esu040)
- Møller, A. P., & Mousseau, T. A. (2006). Biological consequences of Chernobyl: 20 years on. *Trends in Ecology and Evolution*, *21*(4), 200–207. doi: [10.1016/j.tree.2006.01.008](https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.01.008)
- Møller, A. P., & Mousseau, T. A. (2016). Are organisms adapting to ionizing radiation at Chernobyl? *Trends in Ecology and Evolution*, *31*(4), 281–289. doi: [10.1016/j.tree.2016.01.005](https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.01.005)
- Murphy, J. F., Nagorskaya, L. L., & Smith, J. T. (2011). Abundance and diversity of aquatic macroinvertebrate communities in lakes exposed to Chernobyl-derived ionizing radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, *102*(7), 688–694. doi: [10.1016/j.jenvrad.2011.04.007](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.04.007)
- Smith, J. (2007). Is Chernobyl radiation really causing negative individual and population-level effects on barn swallows? *Biology Letters*, *4*(1), 63–64. doi: [10.1098/rsbl.2007.0430](https://doi.org/10.1098/rsbl.2007.0430)
- UNSCEAR. (1996). Effects of radiation on the environment. *Sources and effects of ionizing radiation (UNSCEAR 1996 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes)*. Nueva York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- Yablokov, A. V., Nesterenko, V. B., & Nesterenko, A. V. (2009). Consequences of the Chernobyl catastrophe for the environment. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1181*(1), 221–286. doi: [10.1111/j.1749-6632.2009.04830.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04830.x)

GERMÁN ORIZAOLA. Doctor en Biología, trabaja como investigador Ramón y Cajal en el Área de Zoología de la Universidad de Oviedo y en la Unidad Mixta de Investigación en Biodiversidad-UMIB (Universidad de Oviedo – CSIC – Principado de Asturias, España). Dirige el grupo de investigación en Ecología Evolutiva en Ambientes Extremos de la Universidad de Oviedo (España). Sus investigaciones se centran actualmente en el campo de la radioecología, con los anfibios como principal modelo de estudio. ✉ orizaolagerman@uniovi.es