

# Nanopartículas metálicas como plaguicidas en cultivos agrícolas, ventajas y retos de producción

*Olivia Le Pioufle, Mariana Miranda-Arámbula, Fernando López-Valdez*

\* Laboratorio de Biotecnología Agrícola, Vegetal & Agro-Nanobiotecnología. Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Instituto Politécnico Nacional. Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala. 90700. México.

*Autor por correspondencia: Fernando López-Valdez.*

Carr. Estatal Sta. Inés Tecuexcomac – Tepetitla, km 1.5 s/n. Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala. 90700. México. Tel.: +52 (55) 5729 6000 / 6300, ext.: s/n.

E-mail: flopezva@ipn.mx





## RESUMEN ABSTRACT

Cada año, cantidades masivas de plaguicidas se aplican en los campos agrícolas para controlar plagas y enfermedades de los cultivos para garantizar la producción. Esto ocasiona problemas de contaminación del ambiente y riesgos para la salud humana. Para lograr una agricultura más responsable es fundamental disminuir la aplicación de plaguicidas y desarrollar productos con mayor eficacia. El desarrollo de nanopartículas con efecto plaguicida (o nano-plaguicida), es relativamente nuevo y tiene el potencial de ser una herramienta de gran importancia para la agricultura. Entre ellos, las nanopartículas formadas a partir de metales han mostrado excelentes resultados para contener el desarrollo de plagas. En esta revisión, se propone presentar el interés del uso de nanopartículas novedosas en la lucha contra plagas en cultivos agrícolas. Se discuten las técnicas de síntesis de las nanopartículas metálicas y, en particular, los retos de la biosíntesis, proponiendo asimismo ideas de desarrollos futuros.

**Palabras clave:** Plaguicidas, nano formulación, nanopartículas metálicas, biosíntesis.

Each year, vast quantities of pesticides are applied in agricultural fields with the aim of controlling diseases and ensuring production. This practice has the potential to cause significant environmental pollution problems and pose risks to human health. Therefore, it is essential to reduce the use of pesticides and develop products with greater efficacy in order to promote a more responsible approach to agriculture. The development of nanoparticles with a pesticidal (or nano-pesticide) effect is a relatively new phenomenon with the potential to become a highly important tool for future agriculture. Among these, nanoparticles formed from metals have demonstrated excellent results in the containment of pest development. In this review, we propose to present the interest of the use of these novel compounds in pest control in agricultural crops. The synthesis techniques of metal nanoparticles and the challenges of biosynthesis are discussed, and ideas for future developments will be proposed.

**Keywords:** Pesticides, nano-pesticides, metal nanoparticles, biosynthesis.

## Introducción

En los cultivos se encuentran diferentes tipos de plagas que impactan negativamente en el crecimiento, desarrollo y producción de las plantas. Los plaguicidas son compuestos químicos, la mayoría sintéticos, que se utilizan para disminuir la incidencia de plagas o enfermedades de los cultivos. En el caso de las enfermedades, por lo general se refiere a los provocados por *microorganismos* (bacterias y hongos), *organismos* (nemátodos) o *agentes fitopatógenos* (virus). Pero también se pueden atribuir a organismos más grandes como plantas parásitas o arvenses, herbívoros, entre otros (Horst 2013).

A partir de la Segunda Guerra Mundial, los plaguicidas se han aplicado de manera masiva para aumentar la producción de alimentos, principalmente, para hacer frente al incremento de la demanda (Tudi et al., 2021). En 2020, más de 2.5 millones de toneladas de productos plaguicidas se aplicaron en el campo agrícola a nivel mundial, mientras que, en México, se aplicaron alrededor de 40,000 toneladas de plaguicidas en el mismo año, donde los fungicidas fueron los más usados (FAO, 2020). No obstante, se sabe que la mayoría de estos plaguicidas aplicados no llegan a los organismos dirigidos, acumulándose en los suelos donde generalmente migran hasta las aguas subterráneas, llegando a lugares muy remotos del lugar de aplicación (Hayes

y Hansen, 2017). Dado que la mayoría de estos compuestos son de carácter hidrofóbico y/o recalcitrante (no biodegradable), su acumulación en el ambiente puede representar un riesgo para el buen funcionamiento de los ecosistemas (Yang et al., 2021) y para la salud humana y animal (Dhankhar y Kumar 2023). Otro problema reportado es el desarrollo de la resistencia en plagas, es decir, los organismos objetivo (como insectos) presentan la capacidad de evolucionar, adquiriendo formas resistentes o inmunes, este fenómeno ocurre cuando se aplican plaguicidas sintéticos en forma consecutiva con mecanismos de acción altamente específicos. Para resolver estos problemas de aplicación masiva de plaguicidas y los problemas de resistencia asociados en la agricultura se necesita encontrar compuestos y/o moléculas más versátiles y naturales en la medida de lo posible para evitar perturbar demasiado los ecosistemas.

En las últimas dos décadas, se ha investigado sobre el uso y efecto de nuevas sustancias, compuestos y partículas, algunos por medio de nano ingeniería como una alternativa a lo ya mencionado. En este artículo se presentan las ventajas, desventajas y oportunidades del uso de los nano-plaguicidas en agronomía, en particular, las nanopartículas metálicas y se discutirán sus modos de producción.

## 2

## Ventajas de las nanopartículas como plaguicidas.

Las nanopartículas son el resultado de la combinación de diversos elementos químicos, en el que juntos pueden alcanzar una dimensión entre 1 y 100 nm. En el ambiente se pueden encontrar nanopartículas naturales (Sharma et al., 2015) como en el caso de los óxidos de hierro (Guo y Barnard, 2013) o las nanopartículas de plata (Huang et al., 2019), empero en la actualidad, la mayoría son procedentes de las actividades antropogénicas. Estos últimos años, la investigación y producción de plaguicidas dadas como “nano formulaciones” han tenido un crecimiento fulgurante en la industria agrícola debido a sus propiedades fisicoquímicas particulares. De hecho, por sus tamaños, estas partículas pueden fácilmente penetrar los poros de las células y así tener un efecto de toxicidad amplificado sobre las plagas. Además, estas moléculas presentan áreas de superficie importantes comparado al volumen que ocupan, lo que las hacen más

reactivas y potencialmente más eficaces (Royal Society of Chemistry, 2014). Las *nano-formulaciones* se pueden dividir en dos tipos: *los nanomateriales* (*'carriers'*) que encapsulan y transportan compuestos o plaguicidas y las *nanoestructuras* (nanomateriales funcionalizados) que poseen su propio efecto plaguicida. En el primer caso, se han formulado plaguicidas donde los principios activos se encuentran integrados dentro de un nanomaterial. Estas formulaciones mejoran la eficacia como plaguicidas porque mejoran la estabilidad química del compuesto y permiten una difusión progresiva o controlada tras un estímulo físico, químico o fisicoquímico (riego, luz, o pH, según Chaud et al., 2021). En el segundo caso, por lo general son nanopartículas, que actúan como ingredientes activos, como es el caso de las nanopartículas metálicas, ya sea funcionalizadas o no.

## 3

## Las nanopartículas metálicas como plaguicidas.

Las nanopartículas metálicas (NPM) son nanoestructuras compuestas de átomos metálicos que pueden ser nobles, como el oro, la plata o el platino, o no, como el hierro y el zinc. Estas NPM tienen alcances muy importantes en agricultura, ya que pueden proteger contra fitopatógenos mediante la toxicidad directa de la partícula, así también mediante la estimulación del sistema defensivo de la planta o la promoción de su crecimiento (López-Valdez et al., 2018, Singh et al., 2021).

La toxicidad de las NPM en microorganismos se puede manifestar de dos maneras: tras la interacción directa de las nanopartículas con ellos o por la liberación de iones metálicos a partir de las nanoestructuras (Hernández-Díaz et al., 2020). Las partículas y sus iones pueden desestabilizar las membranas microbianas o atravesar las barreras celulares, perturbando su metabolismo y funciones. En este caso, pueden actuar de diferentes maneras, dañando el material genético, inactivando enzimas, inhibiendo el funcionamiento de las mitocondrias o alterando la síntesis de proteínas (Ameen et al., 2021). Las modificaciones en el metabolismo de la célula pueden resultar en

un desequilibrio en los niveles de estrés oxidativo de la célula, lo que conduce a su muerte. La variedad de los modos de acción de las NPM constituye una ventaja en el combate de plagas, ya que permite mejorar la protección de las plantas contra fitopatógenos resistentes. Según Vera-Reyes et al. (2019) las NPM de óxido de zinc y de óxido de cobre aplicadas al crecimiento de *Clavibacter michiganensis* en medio de cultivo a una dosis de 700 mg L<sup>-1</sup> inhibieron hasta 90% y 66% del crecimiento de *Clavibacter michiganensis* (bacteria fitopatógena que afecta las hojas de las plantas de jitomate), respectivamente. Se conoce que nanopartículas como Ag, Cu, Ni, Mg, Se, Pd, Zn y Fe han mostrado efectos de inhibición sobre el crecimiento de hongos fitopatógenos en experimentos *in vitro* (Cruz-Luna et al., 2021).

Las NP de óxido de zinc, hierro, plata y oro han mostrado efectos de inhibición directos contra virus en condiciones *in vitro*, interfiriendo con la multiplicación de estos y disminuyendo la severidad de las enfermedades virales (Vargas-Hernández et al., 2020). Las nanopartículas también pueden disminuir el estrés oxidativo de la planta inducido por plagas.

Se ha reportado que, en semillas de trigo tratadas con soluciones de nanopartículas de cobre, cobre con zinc, hierro, plata y manganeso, posteriormente infectadas por *Pseudocercospora herpotrichoides*, se observó una menor acumulación de sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBRS), un marcador de la oxidación de los lípidos celulares, en comparación con las plantas sin pretratamiento (Panyuta et al., 2016). Otro mecanismo que podría contribuir a la protección a las plantas contra plagas es a través de la fertilización con nanopartículas. Independientemente de los efectos plaguicidas mencionados anteriormente, cabe mencionar que NPm de cobre, el hierro o el zinc, que son micronutrientes esenciales para las plantas, pueden mejorar significativamente la nutrición de las plantas, así optimar su metabolismo y sus mecanismos de defensa (Servin et al. 2015). Los efectos y modos de acción de las NP dependen del tamaño, forma, composición, cristalinidad, aglomeración y de las propiedades químicas y fisicoquímicas de sus superficies, lo que, en última instancia, se controla a través de las técnicas de producción (Cruz-Luna et al., 2021).



## 4

## Desventajas del uso de nano plaguicidas en agricultura.

Al igual que otros plaguicidas, los nano plaguicidas pueden pasar a través de barreras biológicas y podrían afectar a organismos no objetivo como plantas, animales y humanos, particularmente por concentraciones altas. Podrían ser absorbidas a través de los estomas o absorbidas por las raíces, con posibles efectos citotóxicos y genotóxicos en la salud y crecimiento de las plantas, acumularse en la cadena alimenticia. Por sus propiedades fisicoquímicas únicas, las nanopartículas, especialmente las de tamaños pequeños (entre 10 y 30 nm), pueden ser altamente citotóxicos y actuar como las macromoléculas biológicas, lo que se llama “biomimetismo” (Chaud et al. 2021). Sin embargo, esta toxicidad varía con el tamaño, forma, composición, cristalinidad, aglomeración y de las propiedades químicas y fisicoquímicas de sus superficies, lo que, en última instancia, se controla a través de las técnicas de producción (Cruz-Luna et al. 2021).

### Ventajas



#### Nuevos plaguicidas

Moléculas más eficaces contra plagas por tener varios modos de acción y más citotoxicidad.



#### Micronutrientes

Micronutrientes que mejora el crecimiento del cultivo y su capacidad de hacer frente a plagas.



#### Bajo costo de producción

En el caso de utilizar metales no nobles.



### Desventajas

#### Posible toxicidad

Una formulación y aplicación en cultivos inadecuados pueden resultar en problemas de contaminación y toxicidad tras plantas y animales.



**Figura 1.** Ventajas y desventajas del uso de NPM en Agricultura.

## 5

## Producción de las nanopartículas metálicas

La producción de las nanopartículas metálicas se puede dividir en dos vías principales. La primera es por medios físicos (como la ablación), donde se parte desde metal a granel (barras, láminas, etc.) hasta obtener partículas de tamaño nanométrico, utilizando herramientas como molinos, láseres, entre otras. La segunda vía es química (también bioquímica), que involucra reacciones o procesos químicos, donde los precursores metálicos en soluciones están combinados con especies químicas bajo una variedad de parámetros fisicoquímicos (Bachav y Garde, 2023). Aunque la vía química tiende a consumir un poco más energía en comparación con la ruta física, esta tiene la ventaja de que los procesos químicos involucrados son semi reversibles y dinámicos, lo que permite un mejor control del tamaño de los nanomateriales (Stark *et al.*, 2015).

La síntesis química (bioquímica) permite también sintetizar nanopartículas “funcionalizadas”, es decir, se unen a diferentes grupos funcionales que les permite, por ejemplo, interactuar con el material biológico (estas nanopartículas adquieren “bioactividad”). Una lista breve de los métodos químicos incluye el método “Sol-Gel”, hidrotérmico, de coprecipitación, solvo-térmico, de micro emulsión, prin-

cialmente (Bachav y Garde, 2023). Los métodos mencionados pueden tener diferentes ventajas en cuanto a los costos de producción y el tipo de nanomaterial obtenido. Por ejemplo, el método hidrotérmico requiere de control de presión y de temperatura para llevar a cabo la síntesis de nanopartículas a partir el precursor metálico en un medio acuoso. Este método es particularmente eficaz para sintetizar nanopartículas de tamaño homogéneo, pero requiere una mayor inversión energética y equipos de laboratorio específicos. De manera general, el objetivo de los métodos de síntesis es obtener nanopartículas metálicas químicamente estables, de tamaño y forma homogénea. Otros prerrequisitos para la síntesis son la necesidad de reducir los costos de producción y la contaminación generada por el empleo de sustancias químicas. En este caso, la síntesis biológica, conocida como química o síntesis verdes, emplea compuestos químicos procedentes de plantas o microorganismos, lo que representa una alternativa interesante, ya que no se intenta forzar tanto la aplicación de condiciones críticas, de altas presiones o temperaturas dada la naturaleza de los principios activos o compuestos biológicos.

## 6

## Ventajas y retos de la biosíntesis de nanopartículas metálicas

Desde que se descubrió la capacidad de ciertas moléculas reductoras derivadas de las plantas para convertir sales metálicas en nanopartículas (Haverkamp y Marshall, 2009), se ha investigado el uso de las plantas y sus derivados, especialmente sus extractos acuosos, para sintetizar o funcionalizar nanopartículas metálicas. La biosíntesis tiene diversas ventajas. Los biocompuestos no son tóxicos para la salud, al menos en pequeñas cantidades, son biodegradables y en algunos casos con relativa facilidad para sintetizarlos (dependiendo de diversos factores como la presencia y cantidad de principios activos de la planta), lo que evita el desecho o contaminación innecesaria y hace de estos bioprocesos una alternativa económicamente interesante.

En las últimas décadas, se han logrado obtener nanopartículas metálicas como las de oro, plata o zinc, empleando extractos acuosos y precursores metálicos bajo diferentes condiciones de pH y temperatura (Rani et al. 2023). Aunque los mecanismos y roles de los diferentes biocompuestos involucrados no están completamente elucidados, se ha hipotetizado que los polifenoles, terpenoides y azúcares podrían contribuir a la reducción

de los precursores metálicos. Por otro lado, las proteínas y polisacáridos tendrían un papel más importante en la estabilización de las nanopartículas formadas (Makarov et al., 2014). Las variaciones en la naturaleza y cantidad de los compuestos entre las especies vegetales permiten obtener nanopartículas de diferentes morfologías y tamaños con propiedades distintas contra plagas. La aplicación de estas nanopartículas en plantas se facilita porque se sintetizan en fase acuosa, eliminando la necesidad de eliminar subproductos y residuos químicos que podrían ser tóxicos. Al mismo tiempo, las nanopartículas resultantes de la biosíntesis pueden llevar grupos orgánicos que incrementan su capacidad de interactuar con organismos biológicos. Esto puede aumentar la toxicidad y eficacia contra fitopatógenos u otros organismos (Chaud et al., 2021). Un inconveniente de la biosíntesis de nanopartículas es la falta de control del tamaño, debido a la variación y diversidad de los compuestos en los extractos vegetales, resultando en una importante heterogeneidad de tamaños, que se puede caracterizar como un grado de "polidispersión". Para mejorar esto, es necesario comprender mejor la termodinámica (efectos de temperatura, pH,



disolventes, etc.) y los mecanismos químicos involucrados en la formación de nanopartículas en fase acuosa. Eso incluye la necesidad de identificar y caracterizar mejor el efecto de los biocompuestos y comprobar el uso de moléculas de origen vegetal químicamente puras o combinadas en proporciones conocidas. Finalmente, una solución para obtener tamaños de nanopartículas más homogéneos reside en desarrollar protocolos y métodos de separación por tamaño de las nanopartículas.

Aunque la biosíntesis se ha reportado también con metales no nobles como el zinc, el titanio y el cobre, la investigación se ha cen-

trado más en metales nobles como el oro y la plata debido a la simplicidad y relativa facilidad de su síntesis. Un factor que explica esto es la posibilidad de observar la formación de nanopartículas metálicas biosintetizadas a través de la observación o medición por espectrometría UV-Vis del fenómeno de resonancia de plasmón de superficie de estos metales nobles. Sin embargo, el uso de estos metales para la producción a gran escala de nano plaguicidas podría ser económicamente inviable, por lo que es necesario centrarse en la síntesis de metales más accesibles como zinc, hierro, titanio o cobre.

## Conclusiones

La investigación en nanotecnología con aplicación en agricultura ha experimentado recientemente un incremento considerable. Los nano plaguicidas y en particular aquellos sintetizados a base de metales, presentan numerosas ventajas sobre los pesticidas convencionales, entre ellas, estos plaguicidas tienen diferentes modos de acción, lo que los hace más eficaces frente a fenómenos de resistencias en plagas. Junto con la síntesis convencional química, la biosíntesis se está posicionando como un método sencillo,

por lo general más económico y no contaminante, que además permite la producción de NPM con nuevas propiedades. Sin embargo, se requiere un esfuerzo de investigación para develar todo el potencial de estas moléculas. Es necesario estandarizar los protocolos de síntesis para obtener productos más estables y, de la misma manera que para plaguicidas convencionales, se requiere la caracterización de los efectos de estas sustancias en las plagas y su toxicidad.

## 8

## Agradecimientos

Al CONAHcyT por el apoyo brindado con la beca de postdoctorado (OLP). Al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento (Proy.: 20211596, 20222069, 20232272 y 20242108) y al Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del IPN por recibirme durante esta estancia postdoctoral. Al SNII – CONAHcyT por M. M-A & F. L-V.

- Ameen F, Alsamhary K, Alabdullatif JA, ALNadhari S (2021) A review on metal-based nanoparticles and their toxicity to beneficial soil bacteria and fungi. *Ecotoxicol Environ Saf* 213:112027. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112027>
- Bachav K, Garde AS (2023) Versatile synthesis of zinc oxide nanoparticles via chemical route: A review. *Mater Today Proc*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.269>
- Chaud M, Souto EB, Zielinska A, et al (2021) Nanopesticides in agriculture: Benefits and challenges in agricultural productivity, toxicological risks to human health and environment. *Toxics* 9. <https://doi.org/10.3390/toxics9060131>
- Cruz-Luna AR, Cruz-Martínez H, Vásquez-López A, Medina DI (2021) Metal nanoparticles as novel antifungal agents for sustainable agriculture: Current advances and future directions. *J. Fungi* 7
- Dhankhar N, & Kumar J (2023) Impact of increasing pesticides and fertilizers on human health: A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.766>
- FAO (2020), *Pesticide Indicators*, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/EP> (accessed on 13 December 2022).
- Guo H, Barnard AS (2013) Naturally occurring iron oxide nanoparticles: morphology, surface chemistry and environmental stability. *J Mater Chem A* 1:27–42. <https://doi.org/10.1039/C2TA00523A>
- Haverkamp RG, Marshall AT (2009) The mechanism of metal nanoparticle formation in plants: Limits on accumulation. *J Nanoparticle Res* 11:1453–1463.
- Hayes TB, Hansen M (2017) From silent spring to silent night: Agrochemicals and the anthropocene. *Elementa* 5. <https://doi.org/10.1525/elementa.246>
- Hernández-Díaz JA, Garza-García JJO, Zamudio-Ojeda A, et al (2020) Plant-mediated synthesis of nanoparticles and their antimicrobial activity against phytopathogens. *J Sci Food Agric* 101:1270–1287. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10767>
- Horst RK (2013) *Westcott's plant disease handbook*. Springer Science & Business Media.
- Huang YN, Qian TT, Dang F, et al (2019) Significant contribution of metastable particulate organic matter to natural formation of silver nanoparticles in soils. *Nat Commun* 10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11643-6>
- López-Valdez Fernando, Miranda-Arámbula Mariana, Ríos-Cortés Ada María, Fernández-Luqueño Fabián, and de-la-Luz Verónica (2018) Nanofertilizers and their controlled delivery of nutrients. *In: Agricultural Nanotechnology-Modern Agriculture for a Sustainable Future*. p35-48. Editors: Fernando López-Valdez, Fabián Fernández-Luqueño.
- Makarov VV, Love AJ, Sinitsyna OV, Makarova SS, Yaminsky IV, Taliansky ME, & Kalinina NO (2014) "Green" nanotechnologies: synthesis of metal nanoparticles using plants. *Acta Naturae* (англоязычная версия), 6.1 (20): 35-44.
- Panyuta O, Belava V, Fomaidi S, et al. (2016) The Effect of Pre-sowing Seed Treatment with Metal Nanoparticles on the Formation of the Defensive Reaction of Wheat Seedlings Infected with the Eyespot Causal Agent. *Nanoscale Res Lett* 11:1–5. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1305-0>
- Rani N, Singh P, Kumar, S, Kumar P, Bhankar V, & Kumar K (2023) Plant-mediated synthesis of nanoparticles and their applications: A review. *Materials Research Bulletin*, 112233. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112233>Get rights and content
- Royal Society of Chemistry (2014) Surface area to volume ratio nanoparticle. *Natl. Nanotechnol. Infrastruct. Netw.*
- Servin A, Elmer W, Mukherjee A, et al (2015) A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield. *J Nanoparticle Res* 17:1–21. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-2907-7>
- Sharma VK, Filip J, Zboril R, Varma RS (2015) Natural inorganic nanoparticles-formation, fate, and toxicity in the environment. *Chem Soc Rev* 44:8410–8423. <https://doi.org/10.1039/c5cs00236b>
- Singh RP, Handa R, & Manchanda G (2021) Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of controlled release*, 329, 1234-1248. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051>
- Stark WJ, Stoessel PR, Wohlleben W, Hafner A (2015) Industrial applications of nanoparticles. *Chem Soc Rev* 44:5793–5805. <https://doi.org/10.1039/c4cs00362d>
- Tudi M, Ruan HD, Wang L, et al (2021) Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *Int J Environ Res Public Health* 18:1–24. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>
- Vargas-Hernández M, Macías-Bobadilla I, Guevara-Gonzalez RG, et al (2020) Nanoparticles as potential antivirals in agriculture. *Agric* 10:1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100444>
- Vera-Reyes I, Esparza-Arredondo IJE, Lira-Saldivar RH, et al (2019) In vitro antimicrobial effect of metallic nanoparticles on phytopathogenic strains of crop plants. *J Phytopathol* 167:461–469. <https://doi.org/10.1111/jph.12818>
- Yang T, Lupwayi N, Marc SA, et al (2021) Anthropogenic drivers of soil microbial communities and impacts on soil biological functions in agroecosystems. *Glob Ecol Conserv* 27: e01521. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01521>