

The last of us: ¿ciencia ficción o una posibilidad ante el cambio climático?

The last of us: Science fiction or a possibility in the face of climate change?

Carolina Brunner-Mendoza, Alejandro Jaramillo, Christian Domínguez y Conchita Toriello

Resumen

El videojuego *The last of us* propone una pandemia causada por el hongo *Cordyceps* spp. En este escenario, las personas infectadas terminan siendo seres carentes de voluntad con comportamientos autómatas y caníbales, y la población humana no infectada se encuentra aglomerada viviendo en zonas de cuarentena. Antes del 2019, esto nos hubiera parecido irrisorio, pero después de una pandemia causada por un virus emergente y dos años en confinamiento puede ser motivo de reflexión... ¿Podría un hongo ser el siguiente responsable de una pandemia?

Palabras clave: cordyceps, hongos, pandemia, cambio climático, salud humana.

Abstract

The video game *The last of us* proposes a pandemic caused by the fungus *Cordyceps* spp. In this scenario, infected people end up as will-less beings with automaton and cannibalistic behaviors, and the uninfected human population is crowded together in quarantine zones. Before 2019, this would have seemed something laughable, but after a pandemic caused by an emerging virus and two years in confinement, it may be cause for reflection... Could a fungus be responsible for the next pandemic?

Keywords: cordyceps, fungi, pandemic, climate change, human health.

CÓMO CITAR ESTA COLABORACIÓN

Brunner-Mendoza, Carolina, Jaramillo, Alejandro, Domínguez, Christian, y Toriello, Conchita. (2024, marzo-abril). *The last of us: ¿ciencia ficción o una posibilidad ante el cambio climático?* Revista Digital Universitaria (RDU), 25(2). <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2024.25.2.10>



Carolina Brunner-Mendoza

Laboratorio de Micología Básica, Unidad de Micología, Departamento de Microbiología y Parasitología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Profesora Asociada C de tiempo completo en el Departamento de Microbiología y Parasitología de la Facultad de Medicina de la UNAM, Laboratorio de Micología Básica. Estudió Biología en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco y cuenta con la Maestría en Ciencias Biológicas (Biología Experimental) y el Doctorado en Ciencias, ambos realizados en la Facultad de Medicina, UNAM. Además, realizó una estancia posdoctoral en el Instituto de Ciencias de Atmósfera y Cambio Climático, UNAM. Es miembro nivel 1 del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) del CONAHCYT. Sus principales líneas están enfocadas en la filogenia molecular de hongos entomopatógenos, hongos de importancia médica y análisis metagenómicos de hongos aerovagantes. Es docente de Microbiología y Parasitología de la Licenciatura de Médico Cirujano, Facultad de Medicina, UNAM y en el Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.

 brunner.carolina@facmed.unam.mx

 [0000-0002-8004-6230](https://orcid.org/0000-0002-8004-6230)

Alejandro Jaramillo

Grupo de Hidrometeorología Tropical, Departamento de Ciencias Atmosféricas, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM

Investigador Titular A de tiempo completo en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. Estudió Ingeniería Civil con énfasis en Hidroclimatología y en pronóstico hidrológico y cuenta con una Maestría en Física y un Doctorado en Hidrometeorología. Alejandro se ha enfocado en temas de hidroclimatología tropical, explorando la variabilidad intraestacional en los trópicos y en especial en las oscilaciones tropicales y su efecto en la hidrología. Es miembro nivel 1 del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) del CONAHCYT. Además de su labor investigativa, Alejandro es docente de la orientación en ciencias de la atmósfera de la Escuela Nacional en Ciencias de la Tierra y de la Facultad de Ciencias de la UNAM, así como en el posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM.

 ajaramillo@atmosfera.unam.mx

 [0000-0002-4175-7726](https://orcid.org/0000-0002-4175-7726)

Christian Domínguez

Grupo de Hidrometeorología Tropical, Departamento de Ciencias Atmosféricas, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM

Investigadora Titular A de tiempo completo en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM. Licenciada en Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana, maestra y doctora en Ciencias de la Tierra por la UNAM con orientación en Física de la Atmósfera. Ha publicado varios artículos científicos, dirigido tesis de licenciatura y maestría desde su contratación como investigadora de tiempo completo en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático y es miembro nivel 1 del SNI del CONAHCYT. También, ha sido catedrática de la Facultad de Ciencias de la UNAM desde el 2016 y del Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM desde el 2019. Su principal interés científico se enfoca en la meteorología tropical y en el uso de modelos regionales y globales para elaborar pronósticos estacionales y escenarios de cambio climático considerando la dinámica de los ciclones tropicales y las ondas del este.

 dosach@atmosfera.unam.mx

 [0000-0002-2787-052X](https://orcid.org/0000-0002-2787-052X)

Conchita Toriello

Laboratorio de Micología Básica, Unidad de Micología, Departamento de Microbiología y Parasitología, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Profesora Titular C de tiempo completo en el Departamento de Microbiología y Parasitología de la Facultad de Medicina de la UNAM; funge como Jefa del Laboratorio de Micología Básica. Realizó sus estudios de doctorado en Ciencias Naturales, en la Universidad de Paris, Centre d'Orsay, Francia. Además, es miembro nivel 2 del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) del CONACYT. Sus principales líneas de investigación están enfocadas en hongos entomopatógenos en el control biológico de plagas agrícolas e insectos vectores de enfermedades humanas y hongos de importancia médica. Ha publicado más de 90 artículos científicos en revistas nacionales e internacionales. Ha impartido clases ininterrumpidamente en pregrado desde 1977 hasta la fecha en la asignatura de Microbiología y Parasitología (Micología) en la licenciatura de Médico Cirujano en la Facultad de Medicina, UNAM y en el Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM.

 toriello@unam.mx

 0000-0003-2082-9388



Video 1. Avance del video juego *The last of us*. Crédito: PlayStation Latinoamérica, 2022.

¿Cómo surgió esta aterradora idea?

El argumento central de *The last of us* surgió a partir de estudios realizados por Hughes y colaboradores, quienes son un grupo de investigadores de Estados Unidos. Ellos evaluaron los mecanismos de comportamiento y síntomas morfológicos en las hormigas *Camponotus leonardi* debido a una infección fúngica causada por el hongo *Ophiocordyceps unilateralis*. Las hormigas infectadas presentaban deambulación errática y terminaban muertas y sujetas fuertemente con sus mandíbulas a la nervadura de hojas de árboles, al medio día. Días después de la muerte del huésped, el cuerpo fructífero del hongo emergía de la parte posterior de la cabeza de la hormiga para dispersarse en el ambiente y continuar su ciclo biológico (ver figura 2) (Hughes et al., 2011).

La idea de que un parásito logre controlar el comportamiento de su huésped causó sensación en la comunidad científica. La noticia se popularizó, al grado de permear en el mundo del entretenimiento con historias de terror y acción.



Figura 2. Hormiga infectada por el hongo *Ophiocordyceps*. Crédito: Katja Schulz (2026).

¿Podría ser real esta situación en la actualidad?

En los últimos años, hemos experimentado las consecuencias de la globalización, la aparición de

nuevas enfermedades, migraciones humanas y cambios en el paisaje. Por ello, no se debe descartar el poder de los hongos como el siguiente patógeno emergente causante de una pandemia. No obstante, en esta sección, abordaremos por qué sería poco probable que un hongo como *Cordyceps* spp. fuera capaz de causar la siguiente pandemia.

Cordyceps es un género de hongos con aproximadamente 700 especies, las cuales pueden infectar artrópodos. En la medicina tradicional China, existen productos alternativos basados en especies como *Cordyceps militaris* y *Cordyceps sinensis*, los cuales han demostrado efectos inmunomoduladores, antioxidantes y antiinflamatorios (Paterson, 2008), y actividad antitumoral (Schweta et al. 2023).

De acuerdo con Köhler et al. (2014), los hongos que son capaces de causar infección en los humanos deben cumplir cuatro características: 1) crecer a temperaturas iguales o superiores a los 37°C, 2) penetrar barreras de tejido del huésped, 3) digerir y absorber componentes de tejidos humanos y 4) resistir la respuesta inmune humana. Afortunadamente para nosotros, las especies que comprenden el género *Cordyceps* crecen a una temperatura de 20 a 28°C, con condiciones de humedad relativa de alrededor de 70% y han tenido interacciones evolutivas complejas y estrechas con sus huéspedes artrópodos durante largos períodos (miles de años) (Boomsma et al., 2014). Existen pocos casos clínicos vinculados a *Cordyceps* y los reportados están relacionados con daño renal debido a la ingesta del cuerpo fructífero y suplementos medicinales (Hatton et al., 2018; Tangkiatkumjai et al., 2022) y en ningún caso ha estado relacionado con una infección por dicho hongo.

La vía de transmisión del hongo *Cordyceps* que se considera en la serie *The last of us* es a través de una mordedura de un huésped infectado, ávido por consumir tejidos de otro *Homo sapiens* no infectado. Esa vía de entrada se da en enfermedades causadas por virus, como el de la rabia y el ébola. Sin embargo, en el caso de los hongos que son capaces de causar enfermedades en los humanos, las vías más comunes son: *por contacto directo*, causando infecciones superficiales como el pie de atleta; enfermedades que pueden llegar a capas más profundas de la piel *al sufrir una lesión o traumatismo*, como es el caso de la **esporotricosis**, que se puede adquirir al estar sembrando en tu jardín y hacerte un pequeño corte; *por la inhalación de esporas de hongos*, como la histoplasmosis o la coccidioidomicosis, ser letales, y, por último, *infecciones que están más relacionadas a nuestra respuesta inmunitaria*, si ésta es muy exacerbada ocasiona alergias y si es débil provoca alteraciones en nuestro organismo, haciendo que los hongos que son comensales de nuestra piel o de las mucosas, como *Candida*, tengan un comportamiento patógeno. Si consideramos el mecanismo de infección de *Cordyceps*, o la mayoría de los hongos que son capaces de causar infección en artrópodos, éstos actúan al adherirse a la cutícula del insecto¹, penetrar y llegar a la hemolinfa², tomar los nutrientes y emerger del cadáver para diseminarse al ambiente nuevamente, o también pueden infectar al huésped artrópodo al ser ingeridos, como en el caso del hongo *Ascospaera*.

² Es una capa externa compuesta principalmente de quitina que poseen los insectos. Desempeña un papel esencial en la protección contra la desecación, regulación térmica y defensa contra depredadores y patógenos.

¹ Es un fluido circulante en los invertebrados, incluidos los insectos, equivalente a la sangre en los vertebrados pero diferente en composiciones y funciones, tales como transporte de nutrientes, metabolitos y hormonas, encargado también de la función inmunológica y regulación osmótica.

¿El cambio climático podría hacer real esta situación?

Hasta ahora hemos considerado los puntos que hacen este escenario de infección por *Cordyceps* poco probable. Sin embargo, debemos considerar otros factores, como el cambio climático.

En los últimos años, hemos escuchado constantemente las problemáticas relacionadas con el aumento paulatino de las temperaturas del planeta. Por ejemplo, en la figura 3, se muestra el incremento de las temperaturas globales para las últimas décadas. Este fenómeno, que se ha denominado *calentamiento global*, está asociado a un cambio climático principalmente relacionado a actividades humanas.

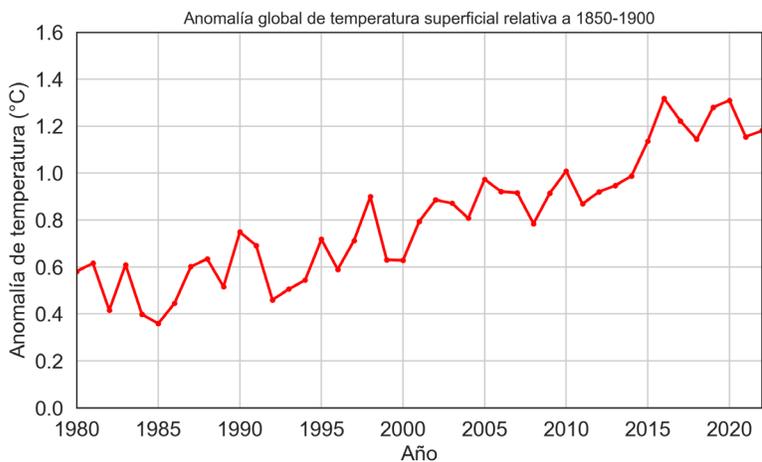


Figura 3. Serie de tiempo de anomalías de temperatura superficial durante el periodo de 1980 al 2020. Las anomalías fueron calculadas como el valor de la temperatura promedio anual menos el promedio del periodo preindustrial que comprende de 1850-1900. Elaboración propia usando datos del reanálisis ERA5 de Copernicus (Hersbach et al., 2020). Crédito: elaboración propia.

A lo largo de la historia, el clima de nuestro planeta ha sufrido cambios ocasionados por fenómenos completamente naturales, como las variaciones de la energía que nos llega del sol, variaciones en la órbita de nuestro planeta, las erupciones volcánicas, e incluso, el lento pero constante movimiento de los continentes (Hartmann, 2016). Aunque gran parte de la variabilidad es natural, las actividades humanas han tenido impactos importantes sobre el clima.

Desde la invención de la agricultura, la humanidad ha intercambiado bosques por zonas de cultivo, construido ciudades e incluso secado lagos. Esto claramente ha cambiado las características climáticas locales alrededor de los poblados humanos. Por ejemplo, el Valle de México estaba conformado por un sistema de lagos, por lo que, su clima era más húmedo durante el período prehispánico de lo que es ahora (Jáuregui, 2000). Además, desde el desarrollo de la era industrial, la humanidad ha usado la energía almacenada en los combustibles fósiles, que liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero (como el dióxido de carbono, metano, entre otros). Estos gases modifican el equilibrio entre la energía que llega del Sol y la energía que nuestro planeta emite nuevamente al espacio exterior, lo que ha modificado el clima actual y producido que las temperaturas superficiales de nuestro planeta aumenten, como lo muestran los registros actuales (Jaramillo y Mendoza-Ponce, 2022).

Las nuevas y futuras condiciones climáticas tienen impacto no sólo en la temperatura, sino también en el nivel medio del mar, en la desaparición paulatina de los glaciares, la acidificación de los océanos, la actividad de huracanes, la diversidad de especies, entre otras (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). Adicionalmente, pueden amenazar directamente la salud humana debido a cambios en el uso de suelo y el aumento de rangos geográficos con condiciones adecuadas para la presencia y desarrollo de ciertos patógenos como bacterias, hongos y virus.

Con respecto al impacto que pueda tener el calentamiento global en los hongos, lo primero que debemos considerar es que su principal función en la naturaleza es la degradación de materia orgánica. Esto quiere decir que sin ellos no habría descomposición y se interrumpiría el ciclo del carbono. De la gran diversidad fúngica estimada, entre 2.2 y 3.8 millones de especies de hongos (Hawksworth y Lücking, 2017), únicamente una pequeña proporción es capaz de causar enfermedades en los humanos y sólo logran infectar cuando la respuesta inmune del huésped está comprometida, como en el caso de pacientes con Virus de Inmunodeficiencia Humana (VIH), receptores de órganos, o personas que usan medicamentos que modulan el sistema inmune.

En el constante proceso evolutivo, los patógenos pueden diversificarse vía salto de huésped y encontrar rutas para lograr la infección en nuevas especies (Thines, 2019). En el caso de los hongos esto no es la excepción y se ha observado que su capacidad de causar enfermedades al humano ha sido un proceso evolutivo que se ha repetido múltiples veces de manera independiente (Rokas, 2022).

Así, en las últimas décadas, se han reportado nuevos casos de infecciones en humanos de hongos que se consideraban no patógenos, como *Emergomyces*, el cual causa micosis diseminada en pacientes infectados con VIH. De igual manera, existen casos de hongos relacionados con nuevos huéspedes mamíferos como *Sporothrix brasiliensis*, el cual es patógeno de felinos y éstos a su vez pueden transmitirlo a humanos; patógenos fúngicos con resistencia a antifúngicos como *Candida auris*; brotes de infecciones fúngicas posteriores a fenómenos extremos como huracanes, temblores,

inundaciones. De hecho, una de las noticias más divulgadas respecto a hongos patógenos fue durante la pandemia por COVID-19: el brote de mucormicosis, que es una enfermedad rara causada por hongos oportunistas y que está relacionada a pacientes con infección por SARS-CoV-2 y diabetes no controlada.

Consideraciones finales

La investigación sobre hongos ha mostrado que algunas especies o cepas patógenas para el humano pueden adaptarse a temperaturas más elevadas, radiación más intensa, condiciones ambientales hostiles y presentar resistencia a antifúngicos utilizados para su tratamiento. En este sentido, las temperaturas más altas debido al calentamiento global podrían conducir a la selección de



Figura 4. Ilustración inspirada en el universo de *The last of us*, que muestra a humanos infectados con *Cordyceps*. Crédito: [bylook](#).

linajes de hongos que pueden infectar más fácilmente a los humanos (García-Solache y Casadevall, 2010). El aumento global de la temperatura, cambios en el uso de suelo, las zonas urbanas con altas tasas poblacionales, hacinamiento y la migración humana pueden ser factores determinantes en el aumento de casos por enfermedades fúngicas.

Pero no olvidemos que los hongos han sido aliados de la humanidad al proporcionarnos metabolitos secundarios utilizados como antibióticos (penicilina); al compartirnos su maquinaria metabólica para producción de etanol y pan (*Saccharomyces cerevisiae*), y que tienen una función natural como controladores de poblaciones de artrópodos que afectan cultivos agrícolas (*Metarhizium* spp.). Sin embargo, la interacción evolutiva entre especies es un proceso imparables y debemos de continuar vigilando y estudiando... El futuro está en nuestras manos.

Referencias

- ❖ Boomsma, J. J., Jensen, A. B., Meyling, N. V., y Eilenberg, J. (2014). Evolutionary interaction networks of insect pathogenic fungi. *Annual Review of Entomology*, 59, 467-485. <https://doi.org/bfsn>
- ❖ García-Solache, M. A., y Casadevall, A. (2010). Global warming will bring new fungal diseases for mammals. *MBio*, 1(1). e00061-10. <https://doi.org/10.1128/mbio.00061-10>
- ❖ Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, Á., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J. P., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A. J., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., . . . Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- ❖ Hartmann, D. L. (2016). *Global Physical Climatology* (2.a ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-00030-0>
- ❖ Hatton, M. N., Desai, K., Le, D., y Vu, A. (2018). Excessive postextraction bleeding associated with *Cordyceps sinensis*: A case report and review of select traditional medicines used by Vietnamese people living in the United States. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 126(6), 494-500. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2018.07.005>
- ❖ Hawksworth, D. L., y Lücking, R. (2017). Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species. *Microbiology Spectrum* 5(4). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.funk-0052-2016>
- ❖ Hughes, D. P., Andersen, S. B., Hywel-Jones, N. L., Himaman, W., Billen, J., y Boomsma, J. J. (2011). Behavioral mechanisms and morphological symptoms of zombie ants dying from fungal infection. *BMC Ecology*, 11, 13. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-11-13>

- ❖ Intergovernmental Panel on Climate Change (ipcc). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (Eds.)]. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- ❖ Jaramillo, A., y Mendoza-Ponce, A. (2022). Climate Change Overview. En M. G. Frías-De-León, C. Brunner-Mendoza, M. del R. Reyes-Montes, y E. Duarte-Escalante (Eds.), *The Impact of Climate Change on Fungal Diseases* (pp. 1-18). Springer International Publishing. <https://doi.org/mhbp>
- ❖ Jáuregui, E. (2000). *El clima de la ciudad de México*. Plaza y Valdés.
- ❖ Köhler, J. R., Casadevall, A., y Perfect, J. (2014). The spectrum of fungi that infects humans. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 5(1), a019273. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a019273>
- ❖ Paterson, R. R. (2008). *Cordyceps*: a traditional Chinese medicine and another fungal therapeutic biofactory? *Phytochemistry*, 69(7), 1469-95. <https://doi.org/bhmzhq>
- ❖ PlayStation Latinoamérica. (2022, 24 de agosto). *The Last of Us Part I | Tráiler de Lanzamiento* [Video]. YouTube. <https://youtu.be/8a3Aga7JjgE?si=devE2Mcj3cg1U5UC>
- ❖ Rokas, A. (2022). *Evolution of the human pathogenic lifestyle in fungi*. *Nature Microbiology*, 7, 607-619. <https://doi.org/10.1038/s41564-022-01112-0>
- ❖ Schweta, Abdullah, S., Komal, y Kumar, A. (2023). A brief review on the medicinal uses of *Cordyceps militaris*. *Pharmacological Research - Modern Chinese Medicine*, 7, 100228. <https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2023.100228>
- ❖ Tangkiatkumjai, M., Chaiyarak, S., Sripr, S., Lumboot, U., Absuwan, W., y Changsirikulchai, S. (2022). Acute kidney injury related to *Cordyceps militaris*: A case series [Preprint, In Review]. <https://doi.org/mhbq>
- ❖ Thines, M. (2019). An evolutionary framework for host shifts – jumping ships for survival. *The New Phytologist*, 224(2), 605-617. <https://doi.org/10.1111/nph.16092>