



Ejes

ECTOMICORRIZAS, SU PAPEL POTENCIAL EN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Griselda Chávez-Aguilar*, Marlín Pérez-Suárez**,
Cristina Burrola-Aguilar**

La concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) se ha elevado 32% (406 ppm) desde la época preindustrial (278 ppm) a la actualidad, esto ha causado un calentamiento global de aproximadamente 1.2°C, y existe la probabilidad de que dicho incremento llegue a 1.5°C entre 2030 y 2052, de continuar aumentando la temperatura al ritmo actual (IPCC, 2019). Lo anterior puede generar cambios no sólo en la cantidad de precipitación, sino en la frecuencia de las lluvias y de eventos extremos como huracanes, ciclones, sequías extremas y heladas severas, lo que pudiera afectar la estructura y funcionamiento de los ecosistemas terrestres (Stuart y Plett, 2020). Por ello, la mitigación del cambio climático es prioridad en las agendas de investigación y políticas ambientales, cuyo objetivo es reducir las concentraciones atmosféricas de CO₂. Una de las principales estrategias de mitigación es la captura y fijación de CO₂ en la

biomasa aérea y de raíces (resultado de la fotosíntesis), esperando que esto redunde en el incremento de los reservorios de carbono (C) en los suelos, donde puede ser almacenado por periodos de tiempo más prolongados (mayor estabilidad) que en la atmósfera y tejido vegetal.

Los microorganismos del suelo, en particular, pueden participar activamente tanto en el secuestro como en la fijación de C en el suelo. En este sentido, las ectomicorrizas (ECM, asociaciones entre los hongos y las raíces de las plantas), son reconocidas como una vía importante de transferencia y acumulación de C en el suelo, con gran potencial en la mitigación del CO₂ atmosférico; más aún en aquellas zonas degradadas o reforestadas donde las ECM promueven el establecimiento y crecimiento de individuos arbóreos. Muchos de éstos, al presentar cuerpos fructíferos comestibles, incrementan no

sólo la productividad forestal y los almacenes de C, sino que brindan el beneficio sociocultural de la relación biológica raíz-hongo (Rojas-Alvarado y Doss, 2014; Garibay-Orijel *et al.*, 2020). Se estima que 30% de la reducción de las emisiones de CO₂ podría lograrse si se evitara la deforestación y degradación y se alcanzara la recuperación de las áreas forestales. No obstante que el conocimiento sobre algunos aspectos de las ECM en los ecosistemas forestales es limitado, particularmente en lo referente al nivel de especificidad con su hospedero, la identificación de las formas fúngicas y su papel en los procesos del ciclo del C es esencial. Por lo tanto, en este documento se presenta una breve reseña sobre la información reportada en torno al ciclo del C y cómo el uso de las ECM del suelo presenta un gran potencial en la mitigación del cambio climático.

*Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Agricultura Familiar.

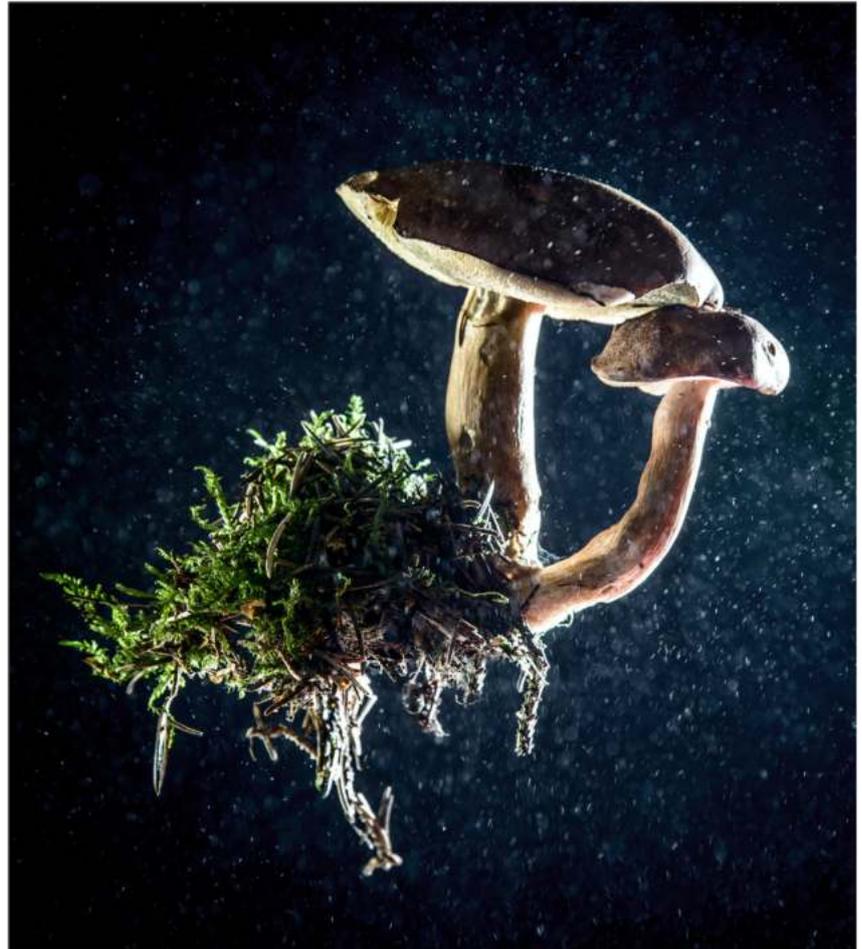
**Universidad Autónoma del Estado de México.

Contacto: mperezs@uaemex.mx

¿QUÉ SON LAS ECTOMICORRIZAS?

Las micorrizas, del griego *myco* (hongo) y *rhiza* (raíz), hacen referencia a la simbiosis entre un hongo y la raíz de una planta. En esta simbiosis, la planta autótrofa (la que produce su propio alimento) se beneficia del hongo simbiote incrementando sus nutrientes y agua, así como de la protección contra patógenos. Por su parte, el hongo heterótrofo (que no produce su propio alimento) recibe de la planta parte del C fijado a través de la fotosíntesis (entre 5 y 30%), el cual es canalizado por el hongo hacia la formación de estructuras propias de la simbiosis. Las ECM (extracelulares), junto con las endomicorrizas (intracelulares), son reconocidas entre los tipos de micorrizas más abundantes, están formadas principalmente por hongos basidiomicetos y ascomicetos microscópicos (Read y Pérez-Moreno, 2003).

Las hifas de las ECM establecen una relación extracelular con las células de las raíces de arbustos y árboles, por lo que inducen cambios sutiles en la morfogénesis de las células epidérmicas o corticales, como la pérdida de pelos absorbentes y la ramificación y acortamiento de la zona apical de la raíz. Las principales estructuras que conforman las ECM son: (1) raíces modificadas (tejidos vegetales y fúngicos) (figura 1); (2) estructuras fúngicas reproductivas (cuerpo fructífero conspicuo; figura 2A y B), valoradas en muchos casos por ser parte de la alimentación del ser humano (figura



2B); (3) el micelio externo o extramatricial (figura 3A y B), el cual está compuesto de hifas absorbentes y cordones miceliales y rizomorfo que se desarrollan en el suelo circundante a las raíces (Ekblad *et al.*, 2013) y (4) la red de Hartig (figura 4A y B), formada a partir del micelio alrededor de las raíces laterales cortas de la planta hospedera.

La red de Hartig actúa como una barrera mecánica que incrementa la resistencia de la planta a enfermedades, es también la interfase a través de la cual los nutrientes son transportados del hongo a la raíz de la planta involucrada en la ECM, por lo que esta red es particularmente importante en el funcionamiento de la simbiosis (Read y Pérez-Moreno, 2003). Por su parte, el micelio extramatricial es

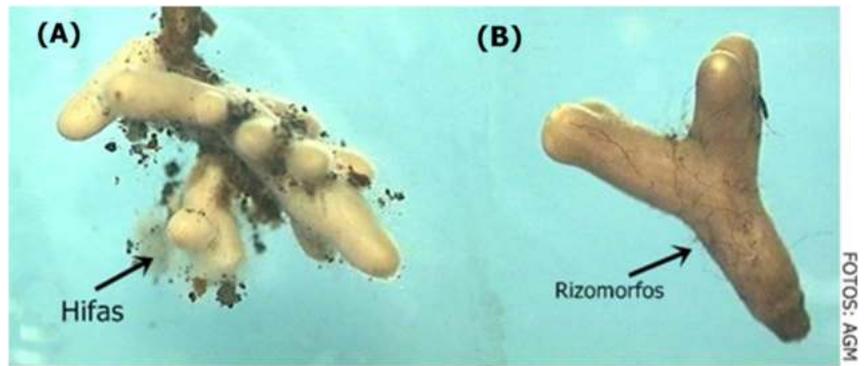


Figura 1. Morfotipos de una raíz micorrizada, donde se observan las hifas (A) que forman un micelio algodonoso y los rizomorfos (B) que incrementan la superficie de contacto de las raíces.

una extensión de la raíz que funciona como propágulo fúngico que se extiende para la exploración del suelo y como medio de transporte para nutrientes y agua del suelo hacia la red de Hartig (Garibay-Orijel *et al.*, 2013).

Las ECM se encuentran en más de 90% de las especies de árboles presentes en bosques templados (Read y Pérez-Moreno, 2003). Sin embargo, el conocimiento sobre la diversidad y función de estas asociaciones es limitado tanto en México como en el resto del mundo. En 2013, Garibay-Orijel *et al.*, por ejemplo, identificaron 20 morfotipos ectomicorrizógenos que no habían sido registrados previamente en bosque de *Pinus montezumae* del centro de México. Esto pone de manifiesto la gran cantidad de especies de hongos ectomicorrizógenos desconocidos a la fecha, así como la necesidad de actualizar constantemente la identidad y número de especies presentes en estas asociaciones para dar paso al estudio de sus funciones. Con relación al ciclo del C en los bosques templados, en particular, se requiere conocer la dinámica, estabilidad y balance de C en suelos, aunado al papel de las ECM en la reforestación y recuperación de áreas forestales a través de su papel en el incremento de la biomasa vegetal y la transferencia e incorporación de C al suelo (vía hojarasca), ambos procesos importantes en la mitigación del cambio climático.



Figura 2. Cuerpo fructífero de hongos ECM: *Russula* sp. (A) y *Boletus edulis* (comestible, B).

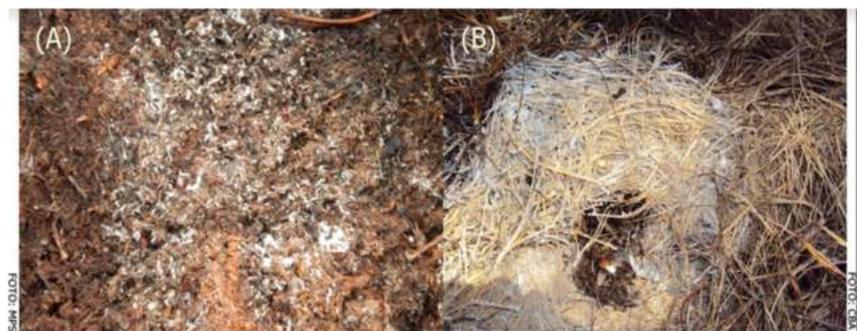


Figura 3. Micelio externo propagado por el suelo (varios metros) en búsqueda de nutrientes y agua (A); micelio propagado en la hojarasca de un bosque de *Pinus* sp., que rodea a un hongo ectomicorrizógeno (B).

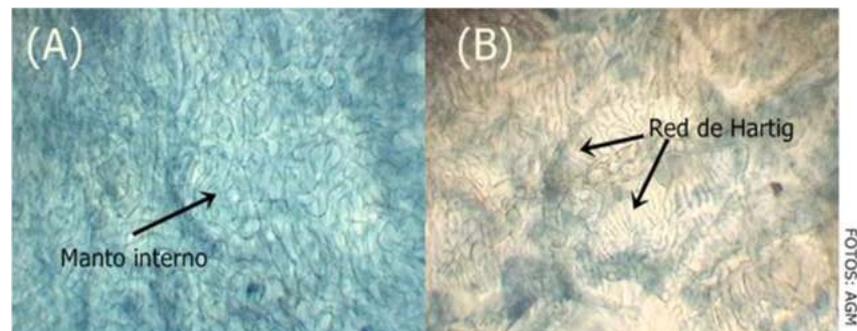


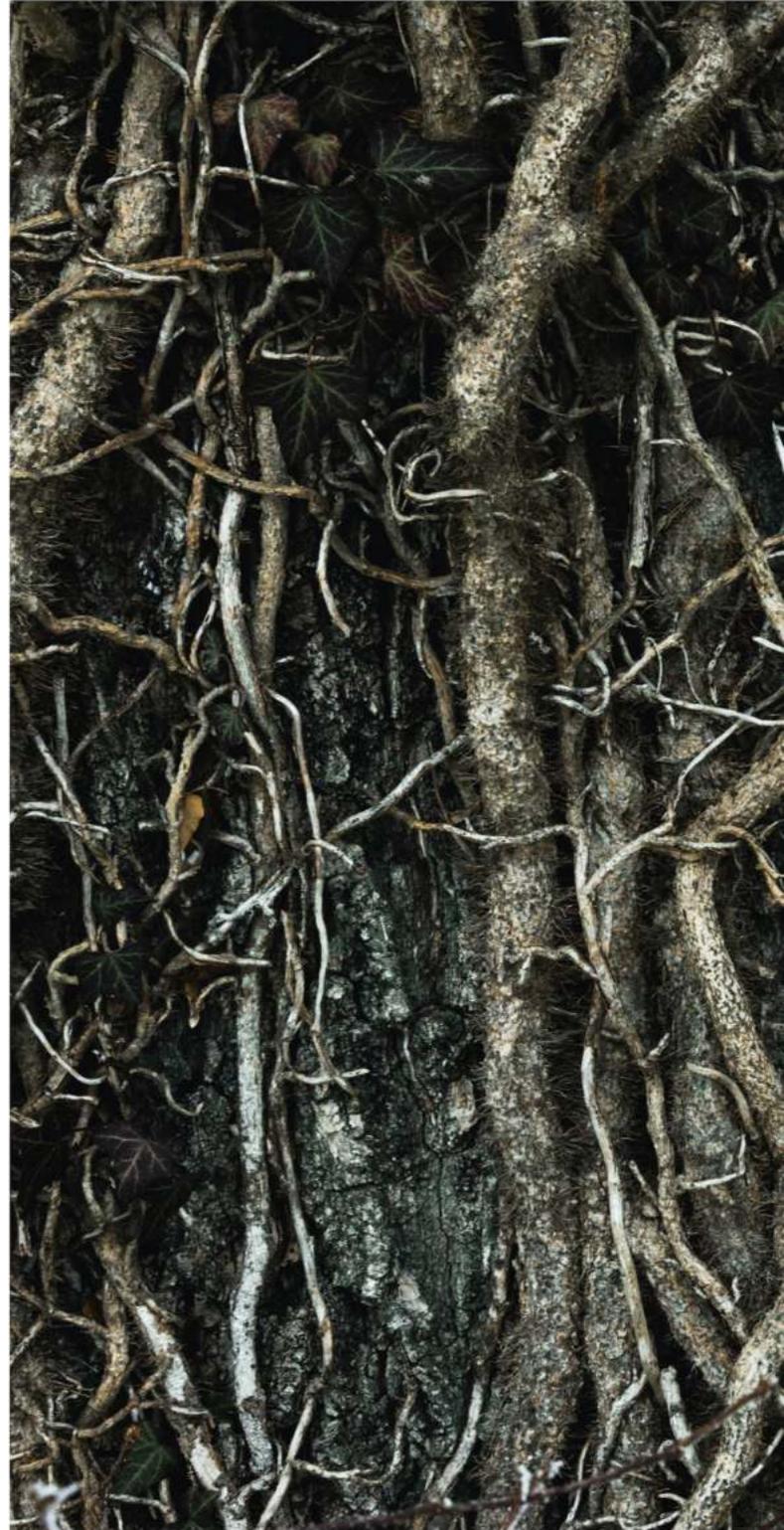
Figura 4. Corte longitudinal de una raíz ectomicorrizógena, donde se observa el manto interno (A) y la red de Hartig (B). Ambas estructuras son críticas para el funcionamiento de la asociación ectomicorrizal.

ECTOMICORRIZAS, SU PAPEL EN LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En los ecosistemas terrestres, el contenido de C orgánico en los suelos es dos a tres veces mayor que el que se encuentra en el tejido de plantas y árboles por arriba del suelo. Las dos principales vías reconocidas de incorporación de este C en los suelos han sido la descomposición de restos orgánicos provenientes de la parte aérea (hojas, ramas, flores, frutos) y subterránea (raíces, microorganismos), y la rizodepositación, es decir, el depósito de compuestos de C (carbohidratos poliméricos y enzimas) que son secretados por las raíces de las plantas. Sin embargo, actualmente se han reconocido las asociaciones ECM como una tercera vía de incorporación de C orgánico al suelo (Deckmyn *et al.*, 2014).

Las asociaciones ECM promueven la entrada de C a los ecosistemas terrestres a través del incremento de la productividad primaria que involucra mayor captura de C-CO₂ atmosférico (retroalimentación indirecta del cambio climático; figura 5), coadyuvando a la planta en la mayor adquisición de nutrientes y agua (Averill *et al.*, 2014). Parte del C fijado a través de la vegetación es almacenado tanto en la biomasa aérea como en la subterránea (sistema radical). Así, el incremento de la producción y acumulación de biomasa en las estructuras vegetales (hojas, ramas, frutos, flores, raíces, etc.) influyen directamente en la cantidad del contenido de C en el suelo y que se incorporan a éste una vez que dichas estructuras han cumplido con su ciclo de vida (residuos vegetales, mantillo o necromasa).

La velocidad de incorporación de C a través de esta vía depende directamente de la cantidad de necromasa acumulada en el piso forestal, de su calidad (cantidad de nutrientes y facilidad de descomposición) y de las condiciones de temperatura y humedad predominantes en el sitio. Sin embargo, un nuevo paradigma plantea que las ECM podrían incrementar la escasez de nutrientes, particularmente nitrógeno (N), en lugar de aliviar sus limitaciones, mediante la disminución del suplemento de N hacia los árboles cuando éste escasea (Agren *et al.*, 2019). Lo anterior podría tener efectos contrarios en la productividad primaria de los ecosistemas, aunado al efecto del retraso en la actividad de los descomponedores por la competen-





cia potencial entre las ECM y otros microorganismos por el N disponible (Averill *et al.*, 2014). Incluso dependiendo del tipo de suelo, la disponibilidad de N y de la especie vegetal, los hongos ectomicorrizógenos podrían pasar de ser benéficos para la planta a actuar como parásitos (Hoeksema *et al.*, 2010; Agren *et al.*, 2019).

El micelio extramatricial es particularmente dinámico dentro del ciclo del C, reportándose diversos mecanismos potenciales sobre su influencia en la entrada, acumulación y dinámica de C en el suelo. Por una parte, el micelio constituye una fracción importante de la biomasa microbiana del suelo en los ecosistemas templados, entre 30 y 50%; biomasa que en sí misma representa un reservorio de C orgánico. Paralelamente, el micelio extramatricial es una vía de entrada significativa (62%) de materia orgánica (MO) al suelo, la cual contiene más de 50% de C, excediendo la entrada a través de la descomposición de mantillo foliar y retorno de raíces finas (Averill *et al.*, 2014). A pesar de que el micelio de las ECM sigue considerándose una vía de transferencia del C derivado de las raíces finas, no se descarta que la micorrización influya sobre la tasa de retorno de las raíces maderables a través de la recalcitrancia (resistencia a la descomposición) de las mismas (Hoff *et al.*, 2004). Aunado a lo anterior, el micelio extramatricial participa activamente en la dinámica de C orgánico disuelto en la solución de los suelos forestales ya que, en conjunto con los exudados de las raíces y metabolitos del mismo micelio, producen la mitad del C orgánico disuelto en un suelo forestal, lo cual promueve la presencia de otros microorganismos que también constituyen un importante reservorio de C orgánico dentro de los suelos.

El C almacenado en los ecosistemas es, por tanto, el resultado del balance entre las entradas y salidas de C de la parte subterránea, de tal manera que las ECM, así como cualquier otro organismo vivo, no sólo contribuyen a la entrada de C-CO₂ al suelo, sino también a la salida de éste a través de la respiración (retroalimentación directa del cambio climático; figura 5). Se ha estimado que las ECM aportan de 3 a 8% del C que representa la respiración de la parte subterránea, dependiendo del tipo de bosque (Moyano *et al.*, 2008). Por otra parte, la estabilidad del C que queda en el suelo es de gran importancia bajo el contexto del cambio climático (figura 5), ya que esta estabilidad está relacionada con el tiempo que dicho C puede permanecer en el suelo, sin representar una amenaza en cuanto al incremento de la concentración atmosférica de C-CO₂.

La estabilidad del C en el suelo en relación con las ECM está asociada a los residuos como quitina y melanina que conforman el micelio de los hongos, y que son pobres en nutrientes. Estos compuestos son transformados lentamente de formas orgánicas a inorgánicas que puedan ser fácilmente asimilables por las plantas, y que contribuyen a la formación de MO más estable. Adicional a la aglutinación de las hifas, lo cual resulta en la formación de macroagregados que protegen físicamente a la MO representada por las hifas, del ataque de los organismos descomponedores; se incrementa el tiempo en que el C, e incluso nutrientes asociados como el N, son almacenados en el suelo (Ekblad *et al.*, 2013).

Un aspecto importante bajo el contexto de cambio climático es que las asociaciones ECM pueden facilitar la colonización de nuevos ambientes por los árboles. Lo anterior particularmente en el caso de especies forestales presentes en bosques templados y boreales, o bien en aquellas ubicadas a elevadas altitudes, cuya adaptabilidad a las bajas temperaturas dominantes las hace especialmente sensibles a los incrementos de temperatura ambiental, obligándolas a migrar o redistribuirse para conservar su nicho climático. Lo que implica para las ECM colonizar sitios con condiciones edafológicas distintas en donde éstas podrían controlar la tasa de migración de dichos árboles, lo cual tiene implícitamente una redistribución del C de la biósfera (Smith *et al.*, 2009).

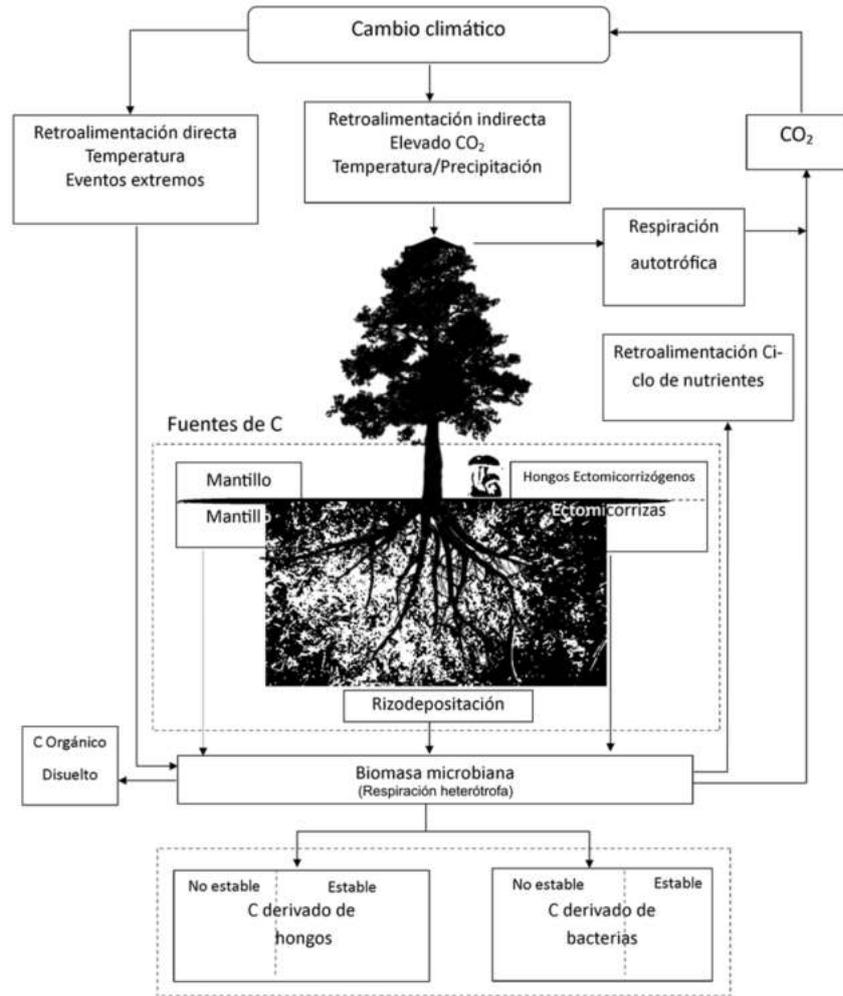


Figura 5. Efectos directos e indirectos del cambio climático sobre la biomasa microbiana, así como las rutas de retroalimentación (captura y producción de CO₂) del calentamiento global.



LAS ECTOMICORRIZAS EN LA REFORESTACIÓN Y RECUPERACIÓN DE ECOSISTEMAS FORESTALES

Una de las vías por medio de las cuales se puede promover la captura y el almacén de C a través de las ECM es mediante su uso en la reforestación y recuperación de los ecosistemas forestales. Se ha observado que la reforestación con plantas ectomicorrizadas promueve que los árboles se establezcan con mayor facilidad incluso en suelos degradados con deficiencias nutrimentales, incrementando la absorción de micronutrientes (fósforo, potasio y N) que forman parte de los lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Durante los primeros años de vida, las plantas ectomicorrizadas presentan un mayor desarrollo en altura, así como un mejor desarrollo del sistema radical, redundando en el incremento de la productividad primaria del ecosistema. La productividad primaria es un indicador del C orgánico transferido de la planta hacia el suelo (Franklin *et al.*, 2014).

La funcionalidad ecológica de la relación hongo-planta ha sido poco estudiada tanto en México como en otros países, de tal manera que la incorporación de los inóculos ECM a planes productivos y de reforestación ha sido relativamente reciente (Rojas-Alvarado y Doss, 2014). Sin embargo, es importante resaltar la necesidad de utilizar en mayor medida hongos nativos que están asociados también a especies nativas que permitan aumentar la sobrevivencia de las plantas en campo, debido a que ambos simbiosomas estarán adaptados a las condiciones ambientales locales (Garibay-Orijel *et al.*, 2013). De esta manera, la selección de hongos ectomicorrizógenos no sólo tendrá beneficios ecológicos, sino también económicos y culturales, dado que los hongos son un producto forestal no maderable que le puede dar un valor agregado a la recuperación de zonas forestales degradadas.

CONCLUSIONES

Bajo el contexto de cambio climático es necesario conocer en qué medida la variación en la especificidad hongo-planta influye sobre la cantidad de C almacenado y distribución a través del perfil de suelo. Adicional a evaluar la presencia e identidad de los taxos de hongos ectomicorizógenos nativos asociados también a especies forestales nativas que permitan aumentar la sobrevivencia de las plantas en campo, dado que ambos simbiosomas estarán adaptados a las condiciones ambientales locales. A la par de lo anterior, se requiere del establecimiento de programas nacionales estandarizados para el desarrollo tecnológico de la propa-

gación y aplicación de inóculos fúngicos nativos que permitan asegurar el establecimiento e incremento de la biomasa forestal; esto con el objetivo de promover la fijación y almacenamiento de C a través de la captura de C-CO₂ atmosférico, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Lo anterior permitirá no sólo conocer y explotar el potencial del suelo como mitigador del C-CO₂ atmosférico, sino del mantenimiento de una diversidad aún desconocida, y de cómo ésta podría verse afectada por el cambio climático.

REFERENCIAS

- Agren, G.I., Hyvönen R., Baskaran, P. (2019). Ectomycorrhiza, Friend or Foe? *Ecosystems*. 22:1561-1572.
- Averill, C., Turner, B.L., Finzi, A.C. (2014). Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage. *Nature*. 0:1-5.
- Deckmyn, G., Meyer, A., Smits, M.M., et al. (2014). Simulating ectomycorrhizal fungi and their role in carbon and nitrogen cycling in forest ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*. 44:535-553.
- Ekblad, A., Wallander, H., Godbold, D.L., et al. (2013). The production and turnover of extrametrical mycelium of ectomycorrhizal fungi in forest soils: role in carbon cycling. *Plant and Soil*. 366:1-27.
- Franklin, O., Näsholm, T., Högberg, P., et al. (2014). Forests trapped in nitrogen limitation-an ecological market perspective on ectomycorrhizal symbiosis. *New Phytologist*. 203:657-666.
- Garibay-Orijel, R., Argüelles-Moyao, A., Álvarez-Manjarrez, J., et al. (2020). Diversity and Importance of Edible Mushrooms in Ectomycorrhizal Communities in Mexican Neotropics. In J. Pérez-Moreno, A. Guerin-Laguette, R. Flores-Arzú, et al. (Eds.), *Mushrooms, Humans and Nature in a Changing World* (407-424). Springer, Cham.
- Garibay-Orijel, R., Morales-Marañón, E., Domínguez-Gutiérrez, M., et al. (2013). Caracterización morfológica y genética de las ectomicorizas formadas entre *Pinus montezumae* y los hongos presentes en los bancos de esporas en la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 84:153-169.
- Hartmann, D.L., Klein-Tank, A.M.G., Rusticucci, M., et al. (2013). Observations: Atmosphere and Surface. In T.F. Stocker, D. Qin, G-K. Plattner, et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate* (pp. 159-254). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hoeksema, J.D., Chaudhary, V.B., Gehring, C.A., et al. (2010). A meta-analysis of context-dependency in plant response to inoculation with mycorrhizal fungi. *Ecology Letters*. 13(3):394-407.
- Hoff, J.A., Klopfenstein, N.B., Tonn, J.R., et al. (2004). *Roles of woody root-associated fungi in forest ecosystem processes: recent advance in fungal identification*. USDA Forest Service RMRS-RP-47.
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático). (2019). *Calentamiento global de 1.5°C. Resumen para responsables de políticas*. Unidad de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo I. OMN, PNUMA.
- Moyano, F.E., Kutsch, W.L., Rebmann, C. (2008). Soil respiration fluxes in relation to photosynthetic activity in broad-leaf and needle-leaf forest stands. *Agricultural Forest and Meteorology*. 148:135-143.
- Read, D.J., Pérez-Moreno, J. (2005). Mycorrhizal and nutrient cycling in ecosystems-a journey towards relevance? *New Phytologist*. 157:475-492.
- Rojas-Alvarado, C., Doss, R.G. (2014). Carbono, bosques y micorizas: una "negación de investigación imperativa". *Brenesia*. 81-82:91-95.
- Smith, W.K., Germino, M.J., Johnson, D.M., et al. (2009). The altitude of alpine treeline: a bellwether of climate change effects. *Botanical Review*. 75:163-190.
- Stuart E.K., Plett, K.L. (2020). Digging Deeper: In Search of the Mechanisms of Carbon and Nitrogen Exchange in Ectomycorrhizal Symbioses. *Frontiers in Plant Science* 10.