

# Hongos micorrícicos: hongos que intercambian nutrientes del suelo por productos carbonados



**Micorriza del griego**  
"myco"=hongo;  
"rhiza"=raíz,  
literalmente significa  
**raíz-hongo.**

Una micorriza es una estructura en la que la raíz y el tejido fúngico se combinan de tal manera que tanto la planta como el hongo se benefician.



Photo credits: [Agriculture and Agri-Food Canada](#), courtesy [M. Vohník](#)

# Hongos micorrícicos: hongos que intercambian nutrientes del suelo por productos carbonados



Los hongos micorrícicos **arbusculares** (AM) se asocian con la mayoría de las plantas

Los hongos **ectomicorrícicos** se asocian con algunas plantas

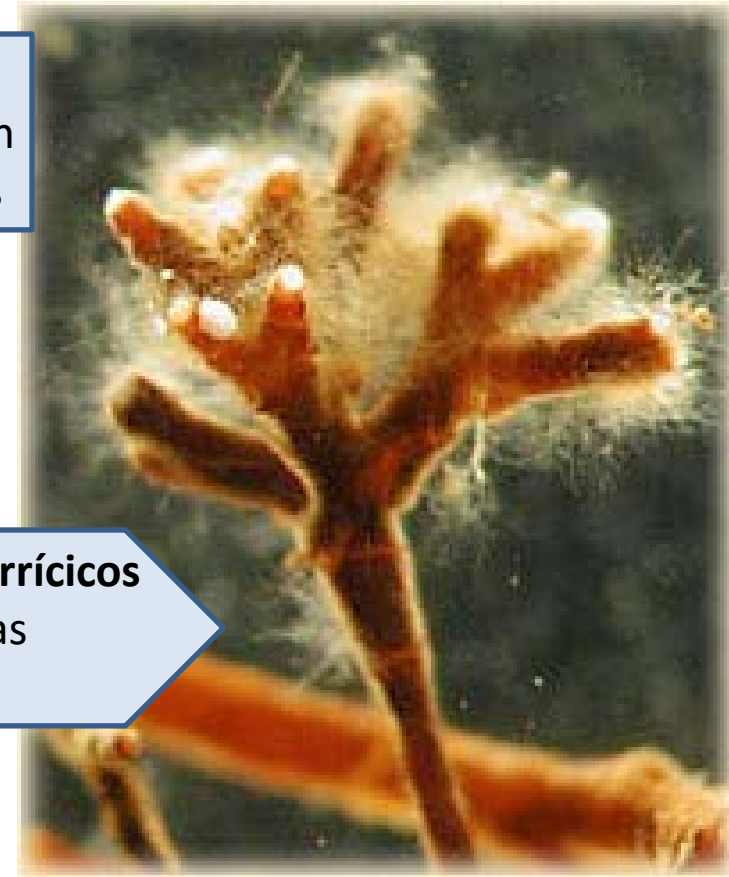


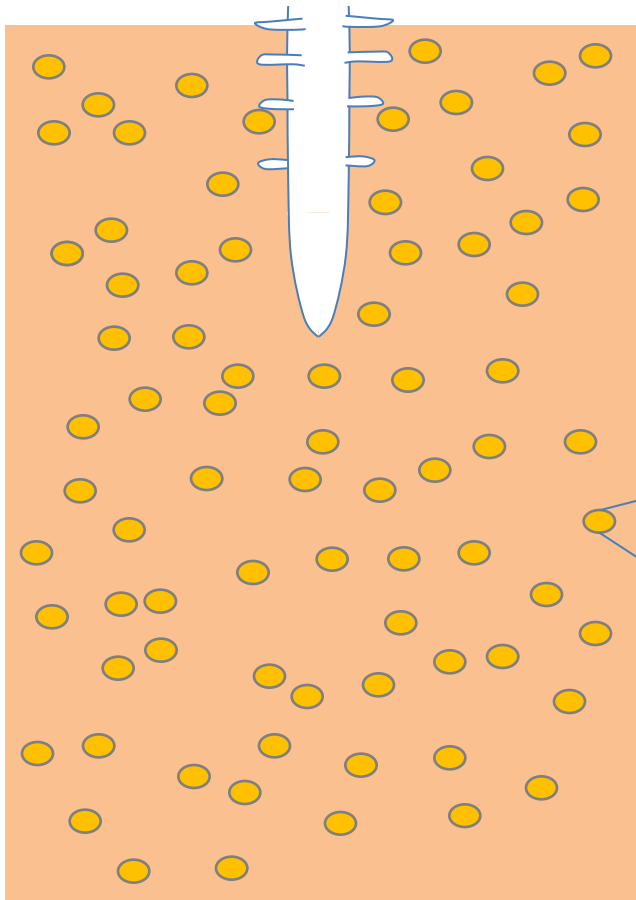
Photo credits: [Agriculture and Agri-Food Canada](#), courtesy [M. Vohník](#)

# Beneficios de la simbiosis micorrícica

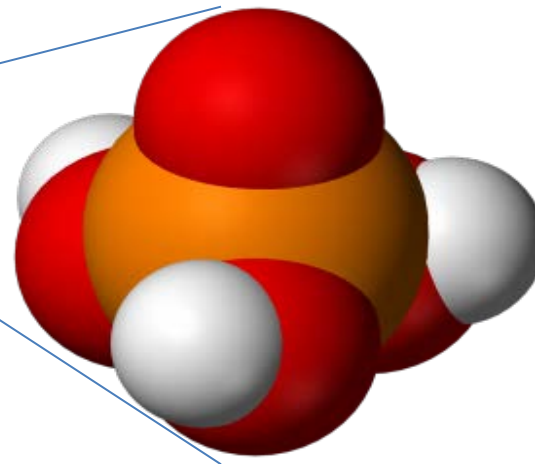
El hongo recibe alimento de la planta en forma de **azúcares y otras moléculas orgánicas** y ofrece numerosos servicios **en contraparte**:

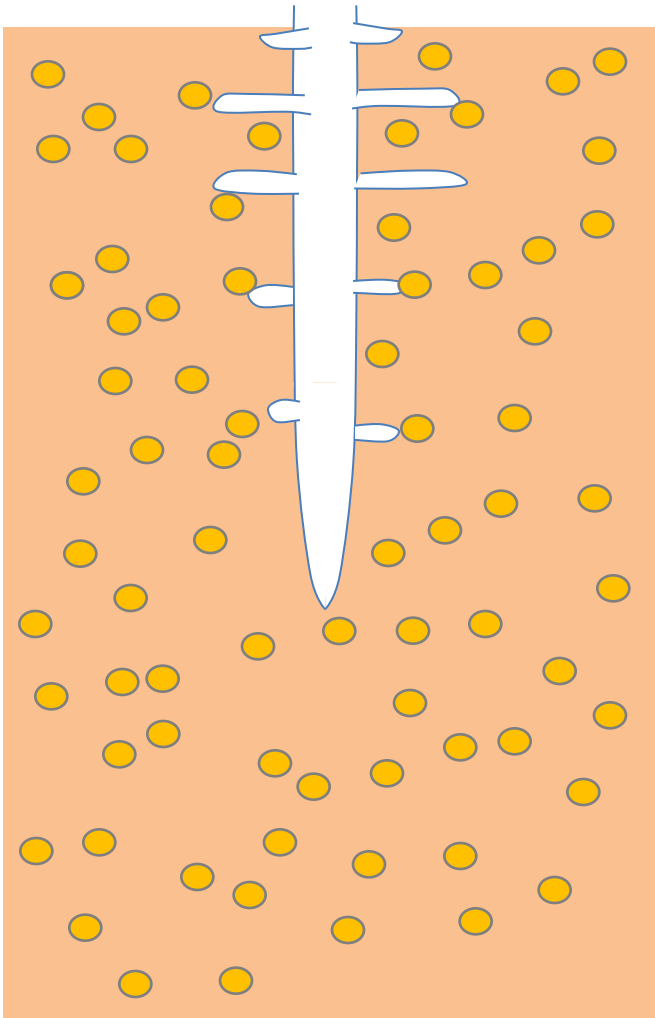
- **Mejorar la absorción de agua y nutrientes**, en particular nutrientes como el **fósforo** que no se mueven fácilmente en los suelos (Miyasaka y Habte 2001). Algunos hongos micorrícicos descomponen la materia orgánica y, al hacer el ciclaje nutrientes, favorecen el regreso directamente de los mismos a las plantas hospedantes (Read 1987, 1991b). Blum et al. (2002) propusieron que los hongos micorrícicos pueden **meteorizar las rocas** y **transferir calcio** a la planta hospedante.
- **Proteger las plantas contra los patógenos radiculares** (Marx 1972, Smith y Read 1997) e inducir **respuestas de resistencia a insectos herbívoros** (por ej. prod. de terpenoides, Sharma et al 2017)
- **Extender la vida útil de las raíces pequeñas.**

# Las plantas tienen dificultad para absorber fósforo insoluble



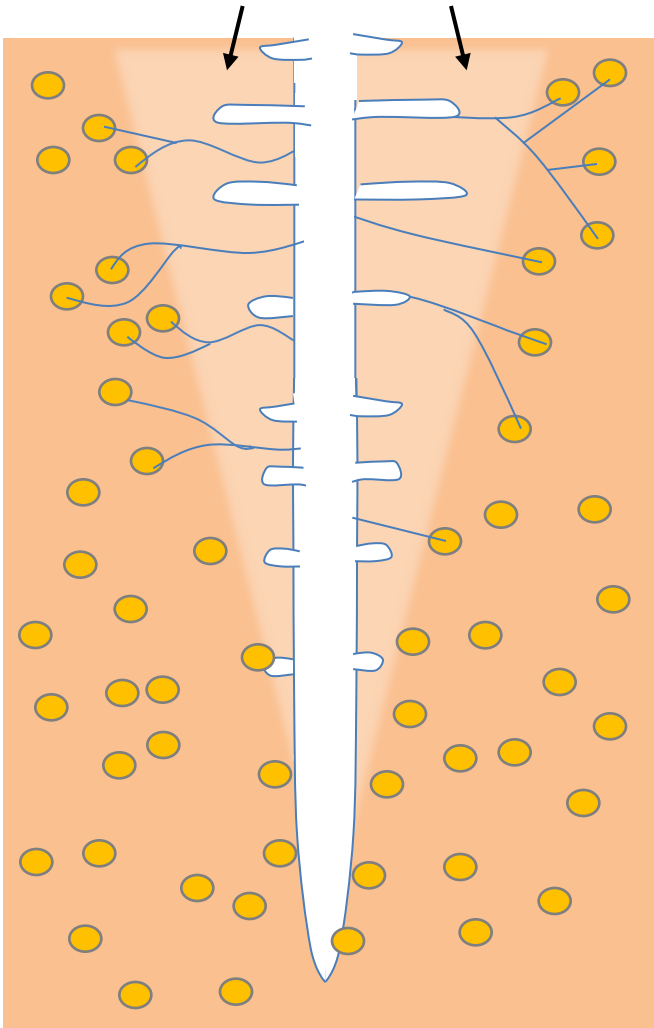
El fósforo es tomado del suelo como fosfato inorgánico,  $\text{HPO}_3^-$





Debido a su baja solubilidad, el  
fosfato cerca de la raíz se agota  
rápidamente

## ZONA DE AGOTAMIENTO



Los hongos micorrícicos se extienden más lejos en el suelo, aumentando en gran medida la asimilación de fosfatos

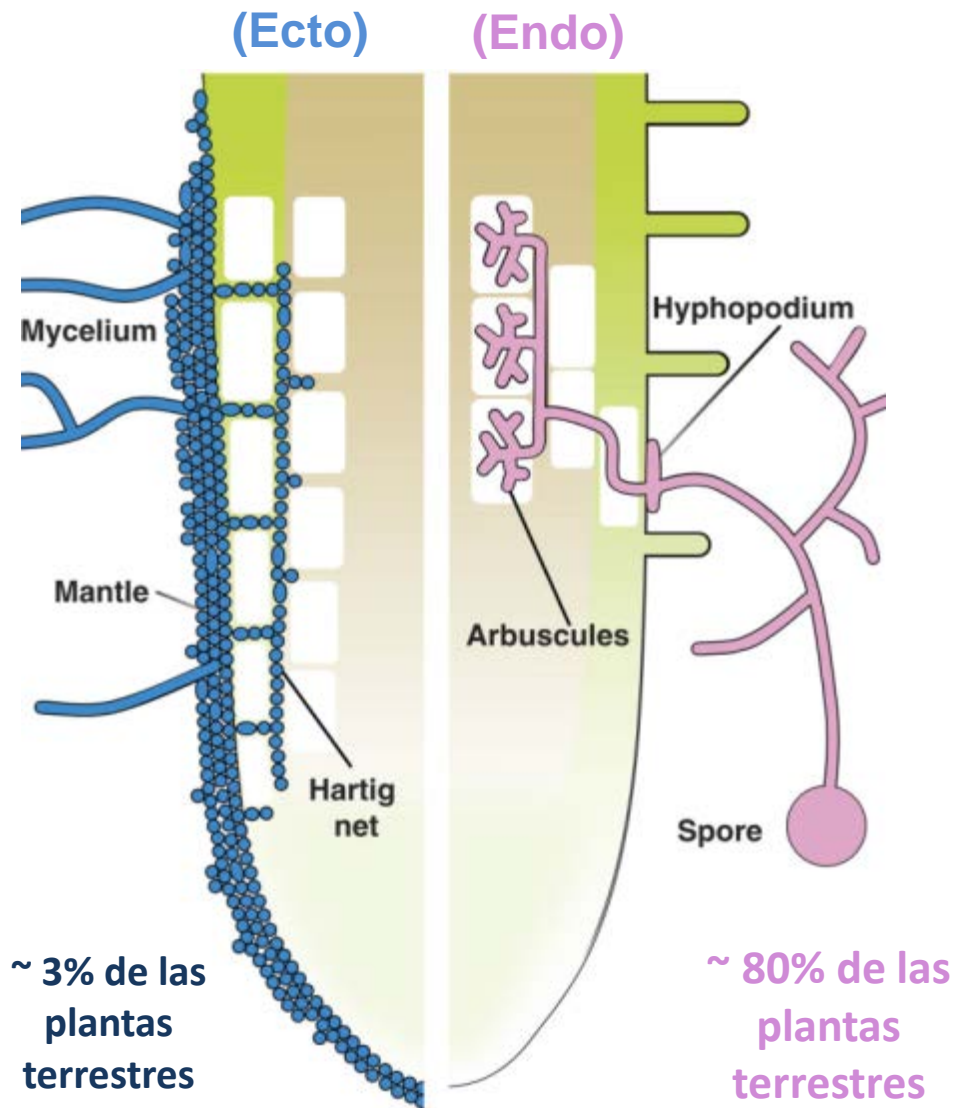
# Beneficios de la simbiosis micorrícica

Los hongos micorrícicos también afectan significativamente los **procesos a nivel de comunidad y ecosistemas** (Leake et al., 2004, Rillig 2004) de las siguientes maneras:

- **Unen las partículas del suelo en grandes agregados**, produciendo así una estructura favorable para la **retención de agua y el intercambio gaseoso** (Rillig et al., 2002).
- Vinculan plantas individuales de la misma especie y de diferentes especies en **redes de hifas comunes** a través de las cuales **pasan C y nutrientes** (Simard et al., 1997, 2003).
- **Alteran la competencia entre las plantas**, influyendo así en la estructura y diversidad de las comunidades vegetales (Perry et al., 1992, Smith y Read 1997).
- **Alteran la relación entre diversidad de plantas y productividad primaria** (Klironomos et al., 2000).
- **Contribuyen significativamente a las reservas de carbono y nitrógeno del suelo** (Rillig et al., 2002).
- Sirven como una importante **fuentes de alimento para los animales** (Johnson 1996)



# Los hongos micorrícicos proliferan dentro o entre las células



Los hongos **ectomicorrícicos** proliferan fuera de la raíz y entre las células, los hongos **endomycorrícicos** (incluidos los hongos micorrícicos arbusculares) proliferan dentro de las células

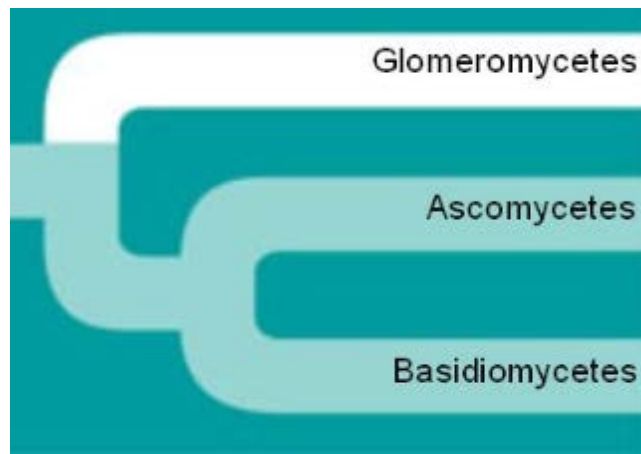
Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd. Bonfante, P., and Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nat Commun* 1: [48](#).



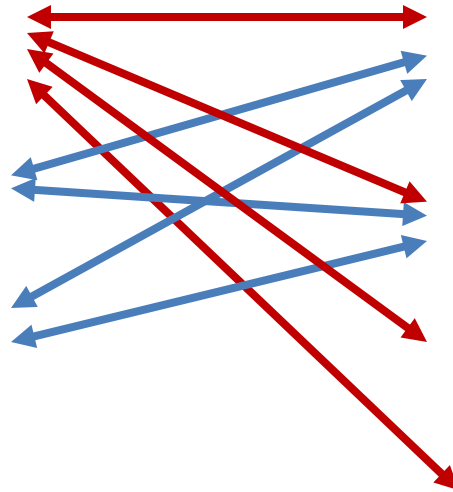
# Distribución de hongos y plantas en simbiosis micorrícicas

Un único phylum de hongos, el Glomeromycetes, forma asociaciones micorrícicas **arbusculares** (AM) con el 80% de las plantas

La simbiosis **ectomicorrícica** ocurre entre muchos diversos hongos y gimnospermas y angiospermas



Árbol de hongos



Árbol de plantas

# Orquídeas y las Ericáceas se asocian con otros hongos

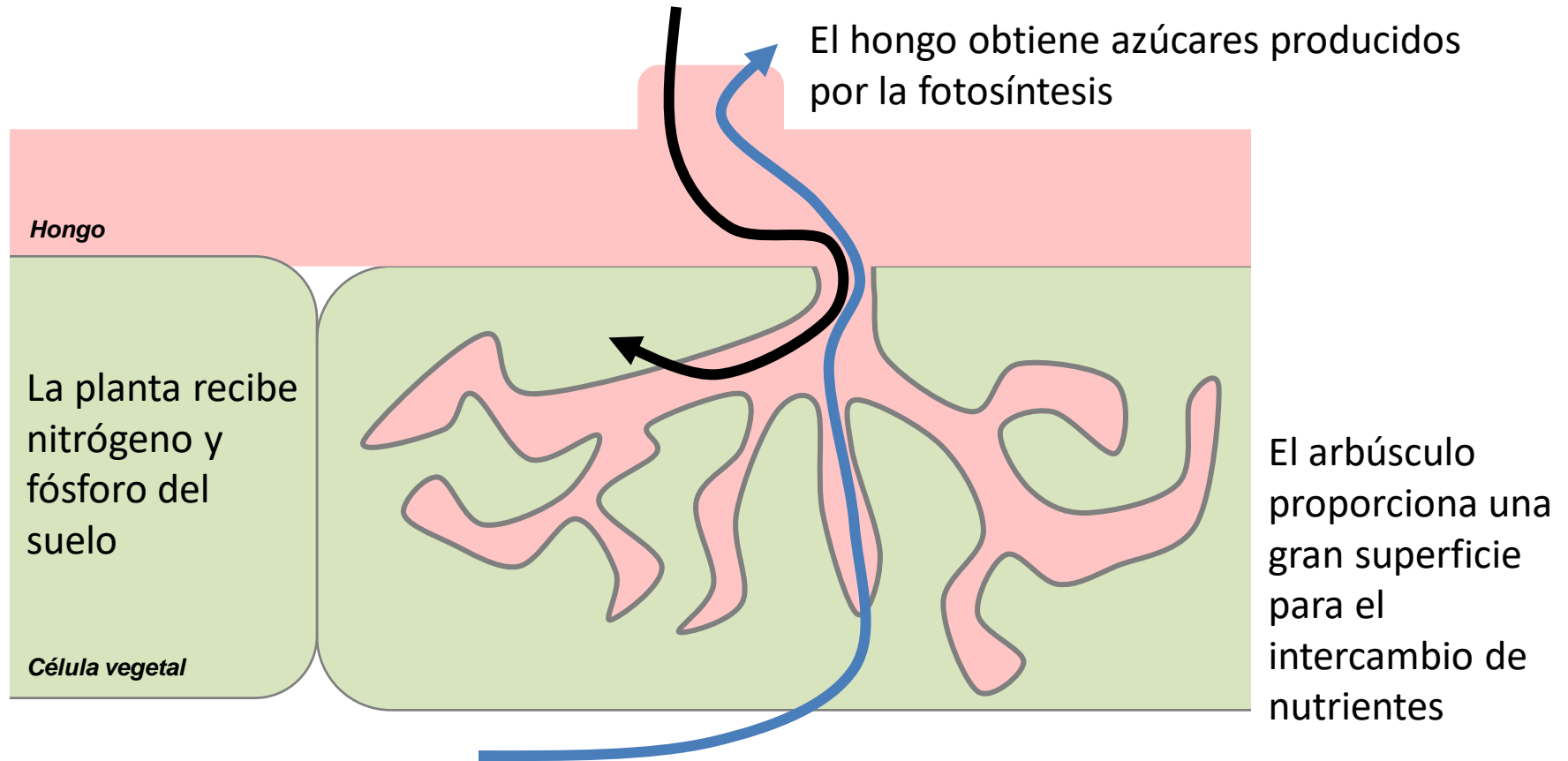
Muchas semillas de orquídeas no germinan sin su socio fúngico especial



El arándano (*Vaccinium macrocarpon*) y el té (*Camellia sinensis*) están en la familia Ericaceae y se asocian con hongos **micorrícicos ericoides**

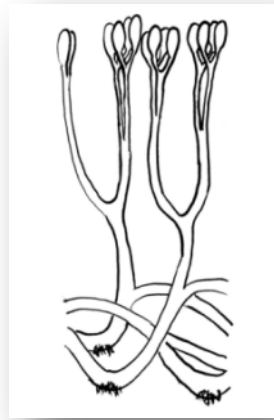
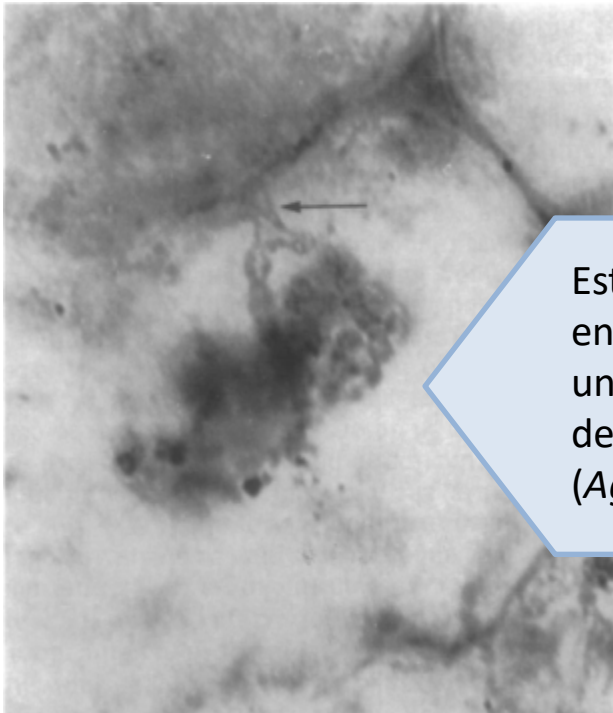
Photo credits: [Mark Brundrett](#); [Cjboffoli](#); [Melanurya](#)

# Los hongos micorrícicos arbusculares entran en la célula de la planta y forman estructuras parecidas a los árboles

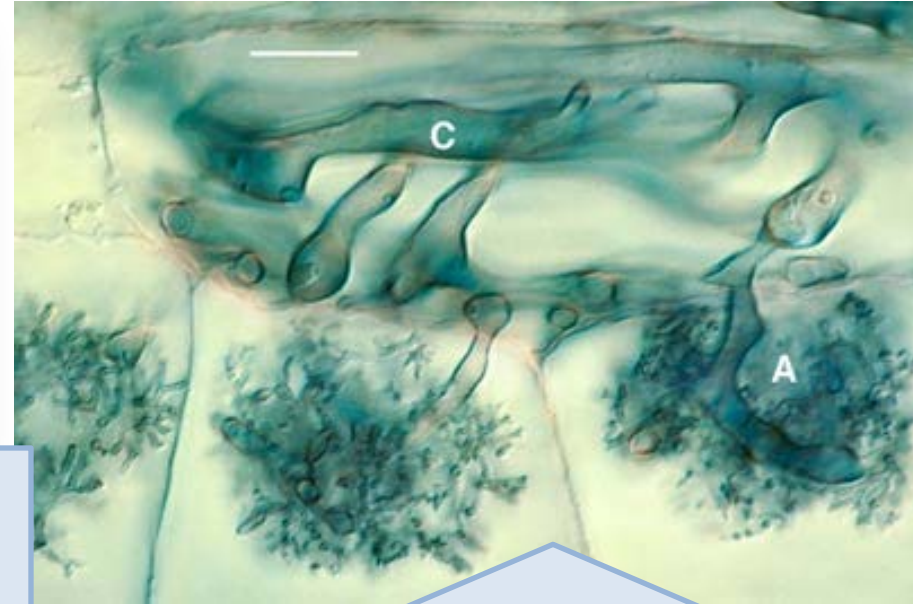


# La simbiosis de la plantas con hongos AM tiene más de 400 millones de años de antigüedad

Hongo AM fosilizado de 400 millones de años dentro de la célula vegetal



Este arbúsculo fue encontrado dentro de una planta fosilizada del Devónico (*Aglaophyton major*)

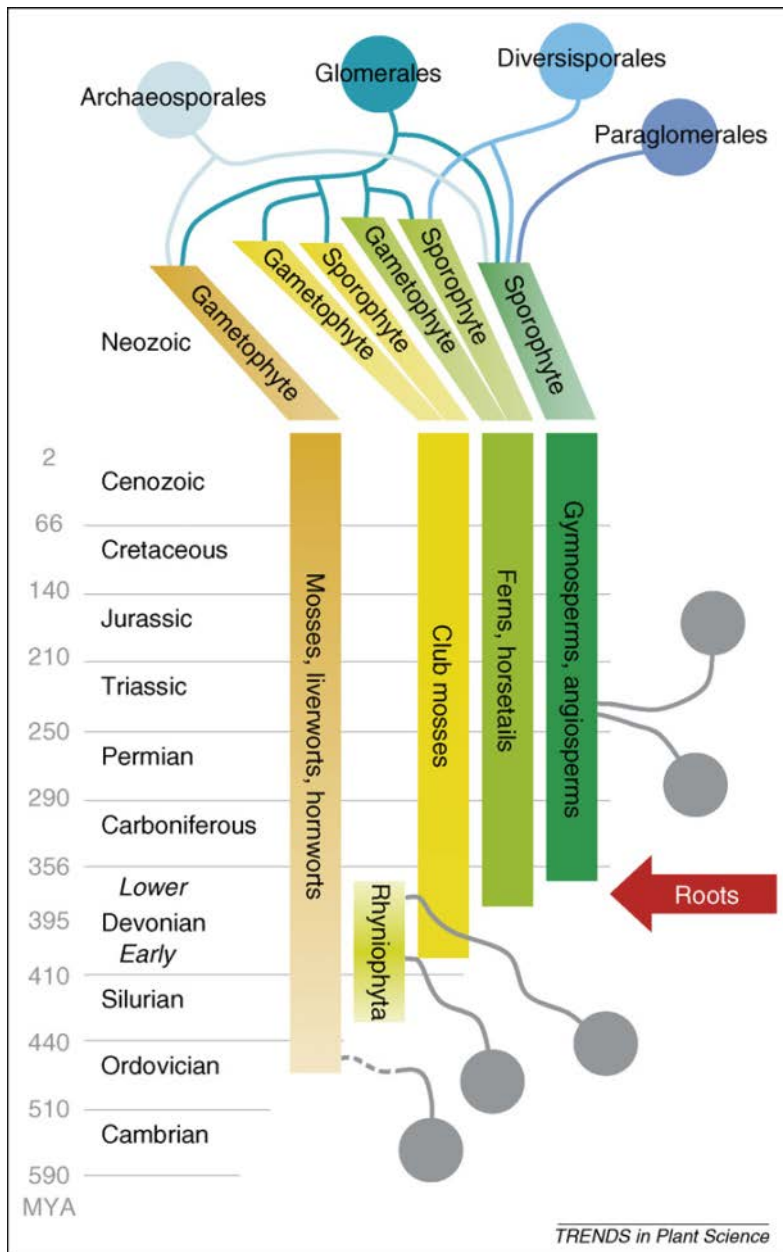


Arbúsculos modernos dentro de células vegetales

Remy, W., Taylor, T.N., Hass, H. and Kerp, H. (1994). Four hundred-million-year-old vesicular arbuscular mycorrhizae. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 91: [11841-11843](#), copyright National Academy of Sciences, USA; Images courtesy of [Griensteidl, Mark Brundrett](#)

# Los hongos micorrícicos arbusculares se asocian con ~ 80% de las plantas terrestres

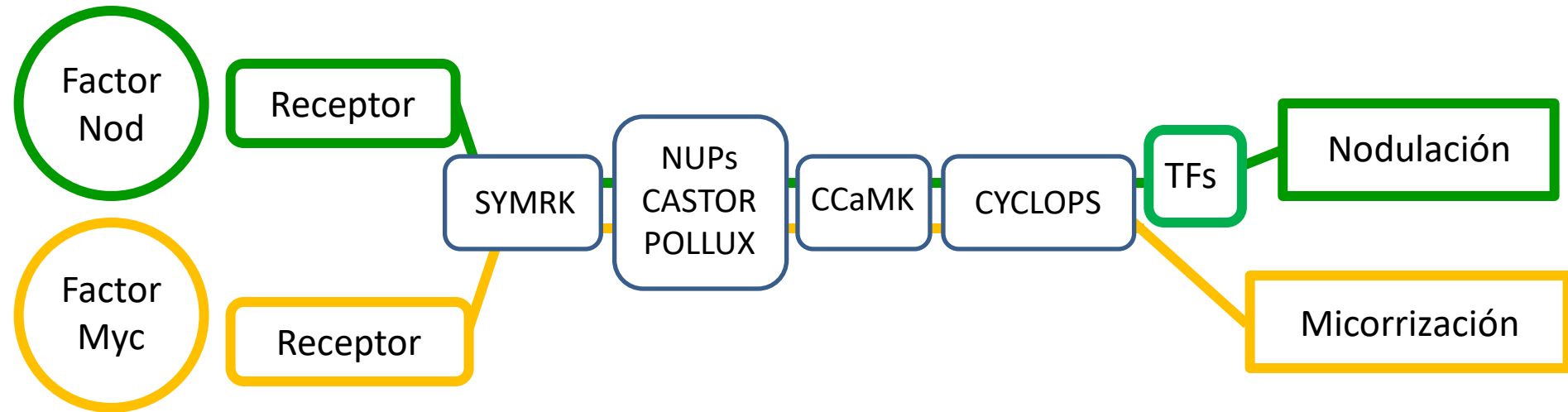
La simbiosis planta - AMF puede haber sido esencial para que las plantas se establezcan en el medio ambiente terrestre mejorando la absorción de nutrientes y agua, y en la actualidad, continúa mejorando el éxito de las plantas



Reprinted from Bonfante, P., and Genre, A. (2008). Plants and arbuscular mycorrhizal fungi: an evolutionary-developmental perspective. *Trends Plant Sci.* 13: [492-498](#) with permission from Elsevier.

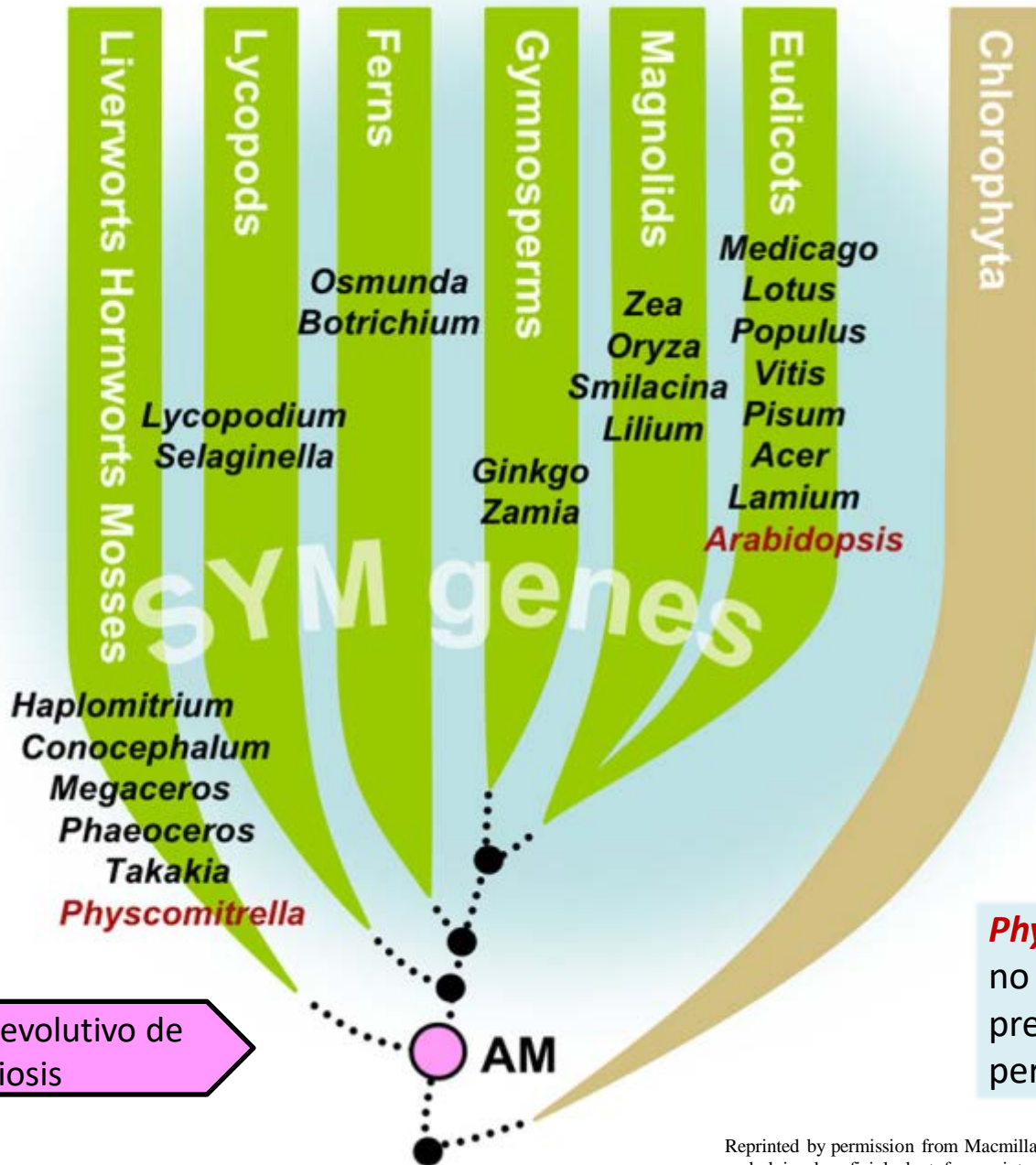


# La simbiosis de hongos AM también utiliza la vía SYM





# Los genes *SYM* se conservan funcionalmente a través del reino Plantae



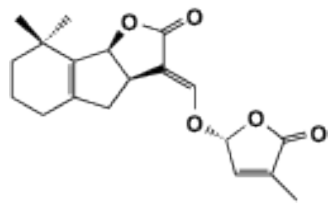
Origen evolutivo de la simbiosis

*Physcomitrella* y *Arabidopsis* no forman simbiosis AM, presumiblemente porque han perdido la capacidad

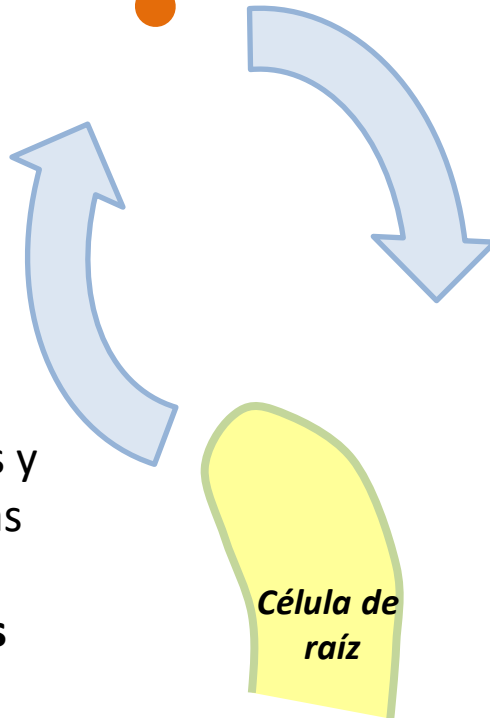
Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd. Bonfante, P., and Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. Nat Commun 1: [48](#).

# Señalización entre hongos AM y las plantas

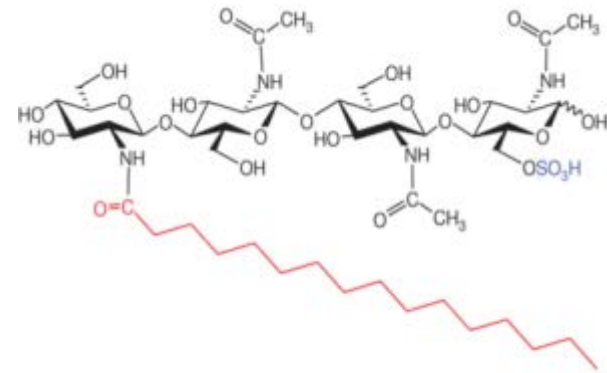
1. La raíz de la planta produce **estrigolactonas** y otras sustancias químicas que estimulan la **ramificación de las hifas de los hongos**



Hongo



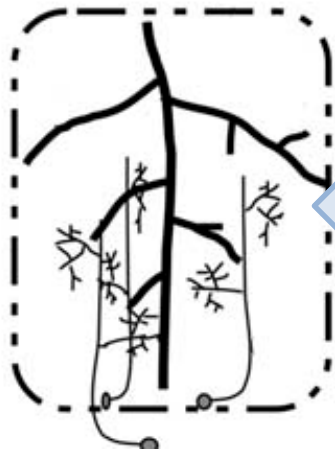
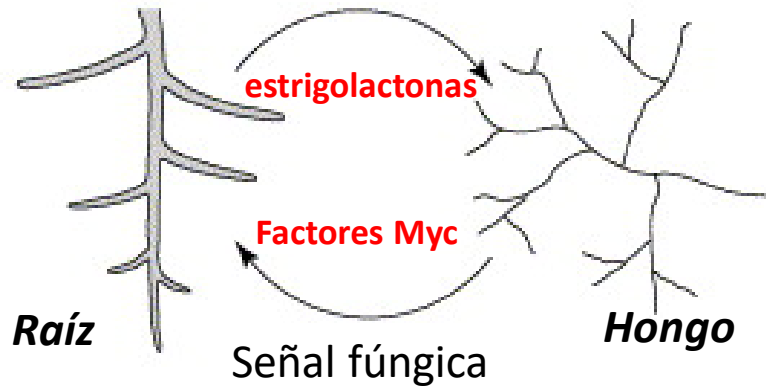
2. Los hongos producen un **factor Myc**, identificándose como un simbiote



3. La planta se prepara para permitir que los hongos penetren en sus células

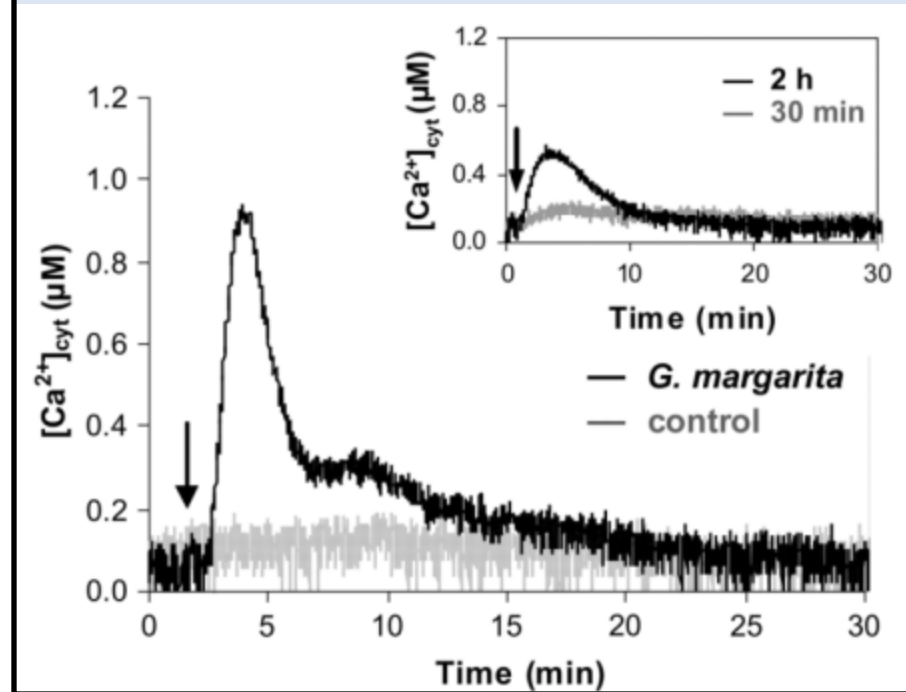
# Los factores Myc son señales solubles que inducen las respuestas de la planta

Estímulo de ramificación



Los factores Myc pueden moverse a través de una barrera de permeabilidad para inducir la ramificación de raíces

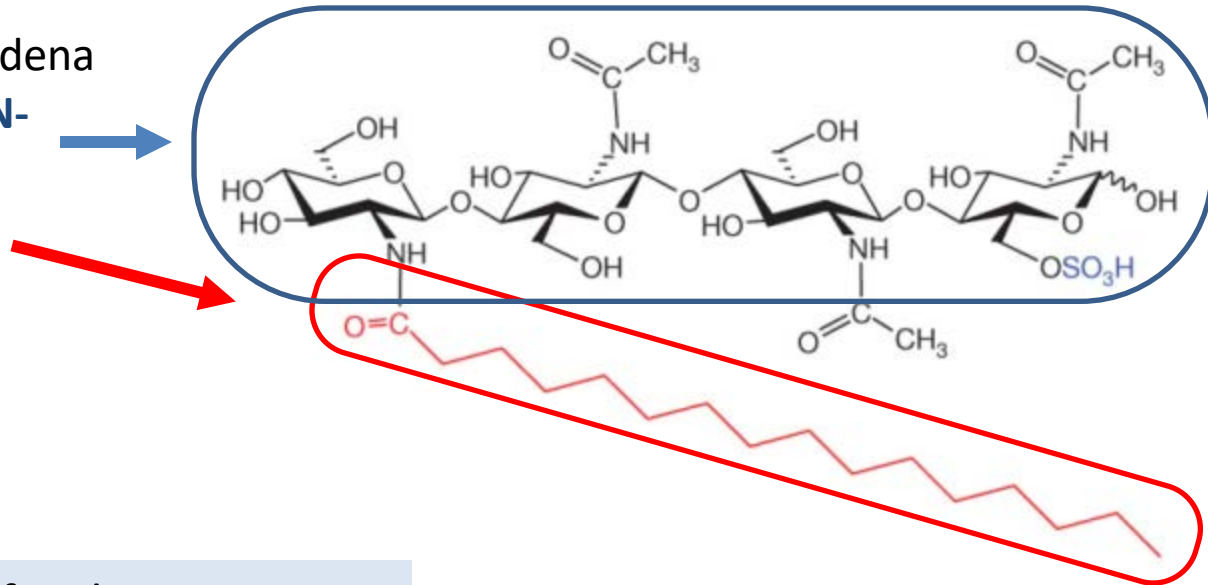
Los factores Myc inducen un pulso de calcio transitorio en las células vegetales



Adapted from Martin, P. (2004). Molecular genetics of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Curr. Opin. Plant Biol.* 7: [414-421](#); Navazio, L., Moscatiello, R., Genre, A., Novero, M., Baldan, B., Bonfante, P. and Mariani, P. (2007). A diffusible signal from arbuscular mycorrhizal fungi elicits a transient cytosolic calcium elevation in host plant cells. *Plant Physiol.* 144: [673-681](#); Kosuta, S., Chabaud, M., Loughon, G., Gough, C., Dénarié, J., Barker, D.G. and Bécard, G. (2003). A diffusible factor from arbuscular mycorrhizal fungi induces symbiosis-specific *MtENOD11* expression in roots of *Medicago truncatula*. *Plant Physiology.* 131: 952-962.

# Los factores Myc caracterizados son Lipo Cito Oligosacáridos (LCO)

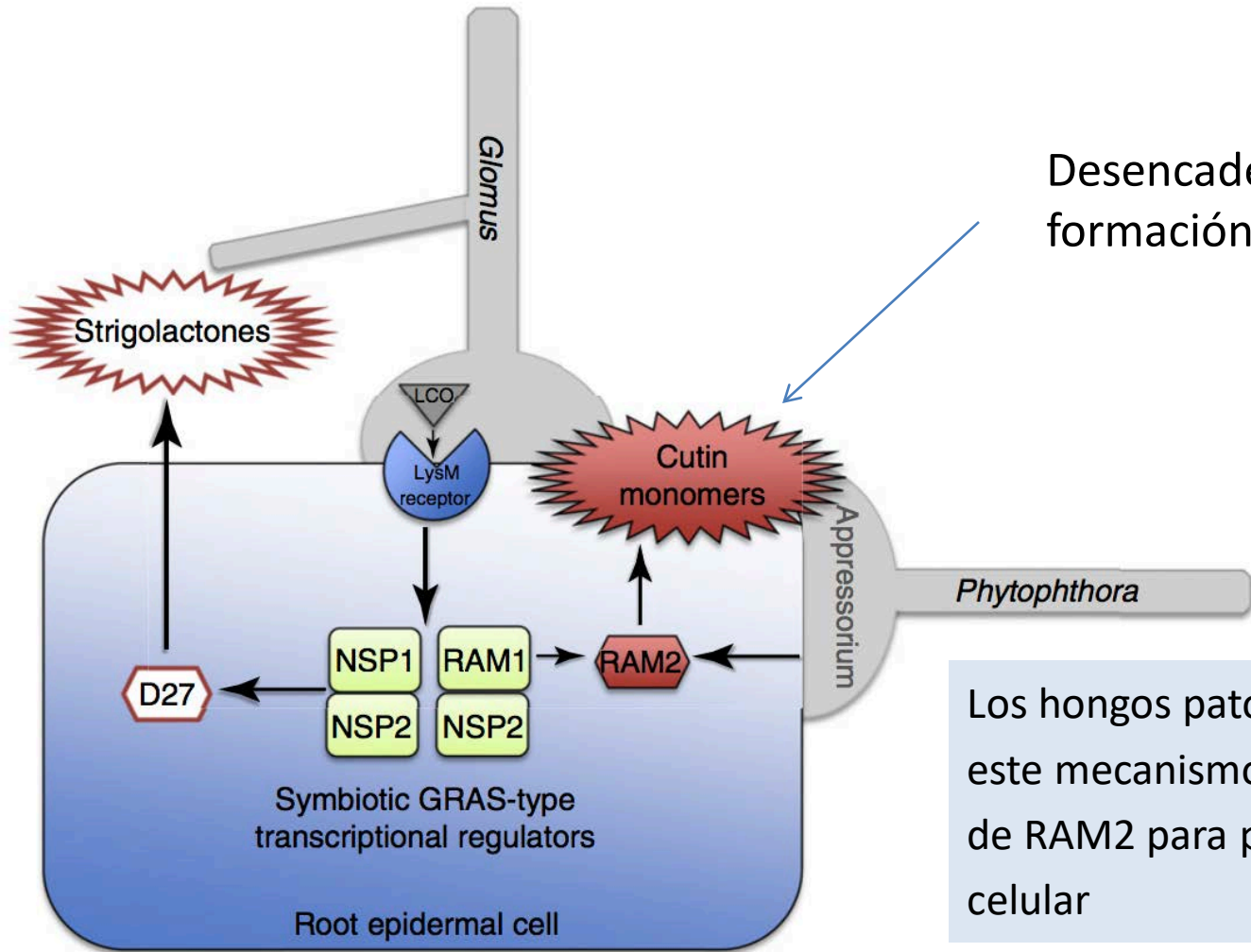
Los factores Myc tienen una cadena central de **residuos de azúcar N-acetilglucosamina** (quitina) y **un residuo lipídico**



Algunos compuestos identificados como factores Myc son similares a los factores Nod vinculados a rizobios.

Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd. Maillet, F., Poinso, V., Andre, O., Puech-Pages, V., Haouy, A., Gueunier, M., Cromer, L., Giraudet, D., Formey, D., Niebel, A., Martinez, E.A., Dríguez, H., Becard, G. and Denarie, J. (2011). Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza. *Nature*. 469: [58-63](#).

# Los factores de transcripción de GRAS controlan la señalización AM

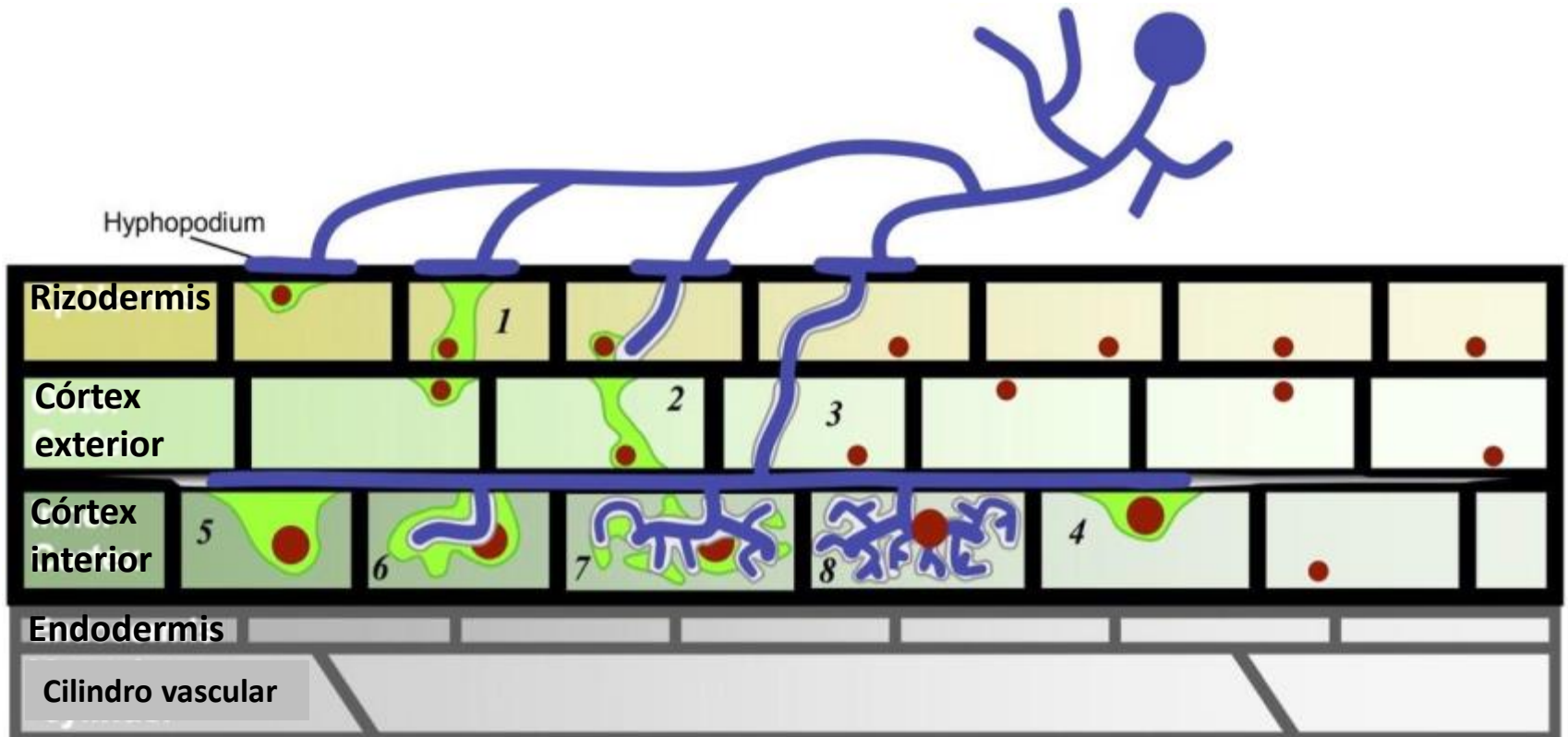


Desencadenantes de la formación de apresorios

Los hongos patógenos pueden utilizar este mecanismo induciendo la expresión de RAM2 para permitir la invasión celular

Geurts, R., and Vleeshouwers, V.G. (2012). Mycorrhizal symbiosis: ancient signalling mechanisms co-opted. *Curr Biol.* 22: [R997-R999](#).

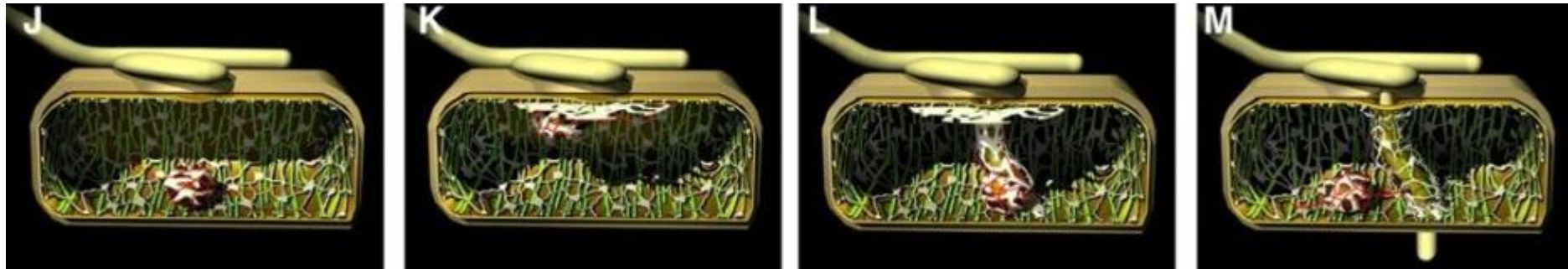
# Hongos AM se ramifican fuera de la raíz, entre las células de las raíces, y dentro del córtex



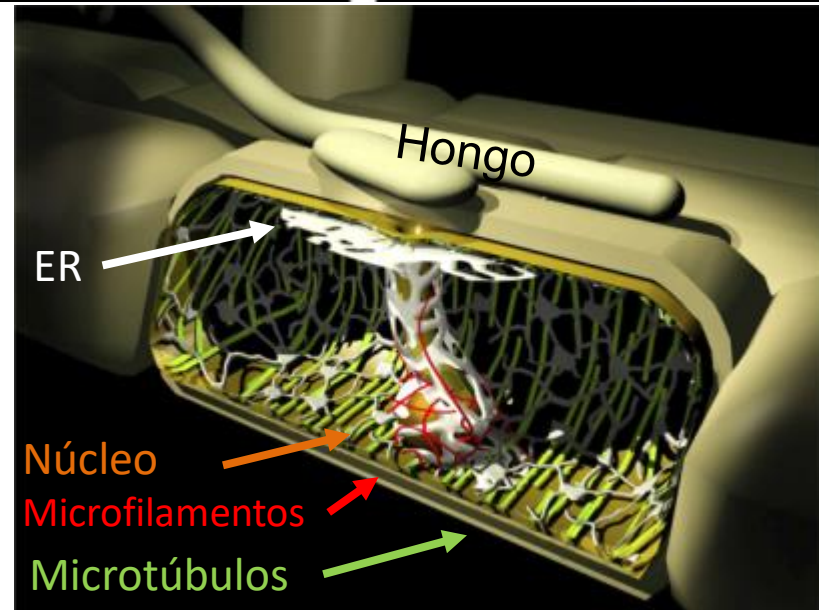
Genre, A., Chabaud, M., Faccio, A., Barker, D.G. and Bonfante, P. (2008). Prepenetration apparatus assembly precedes and predicts the colonization patterns of arbuscular mycorrhizal fungi within the root cortex of both *Medicago truncatula* and *Daucus carota*. *Plant Cell*. 20: [1407-1420](https://doi.org/10.1105/PC.107108).



# Las células vegetales responden dinámicamente a los hongos micorrícicos

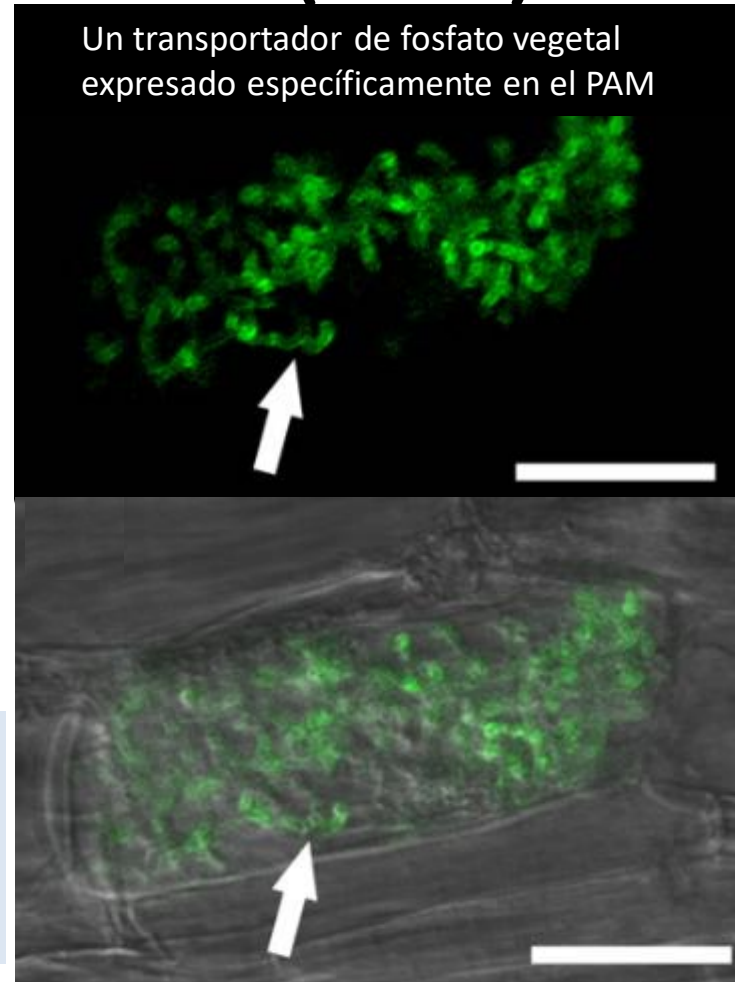
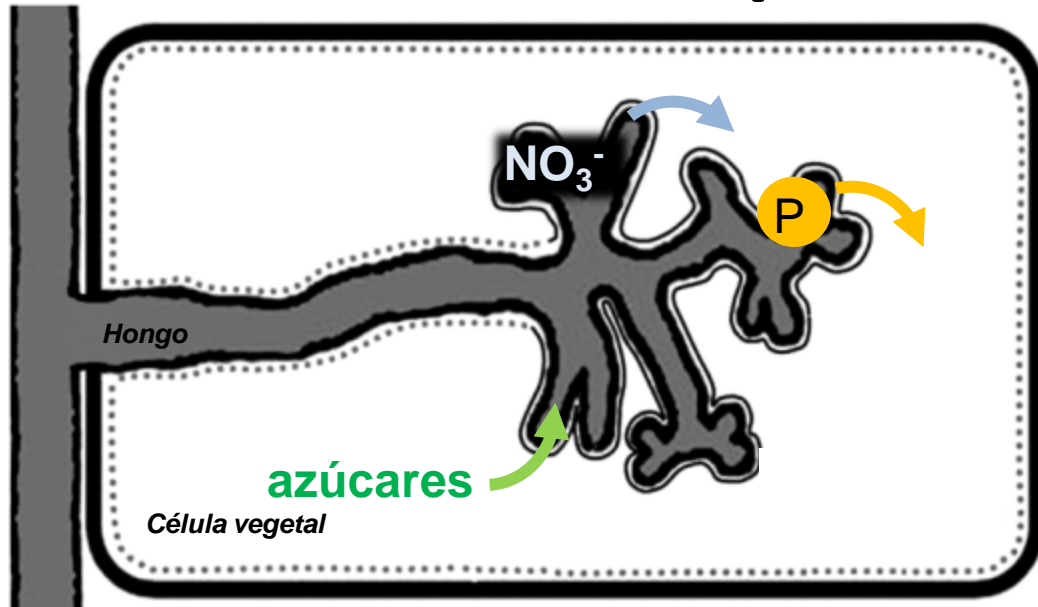


Las células epidérmicas forman un aparato de pre-penetración (PPA) en anticipación a la penetración fúngica - **la planta ayuda activamente a la entrada de hongos**



Genre, A., Chabaud, M., Timmers, T., Bonfante, P. and Barker, D.G. (2005). Arbuscular mycorrhizal fungi elicit a novel intracellular apparatus in *Medicago truncatula* root epidermal cells before infection. *Plant Cell*. 17: [3489-3499](#). (Figure courtesy of Andrea Genre.)

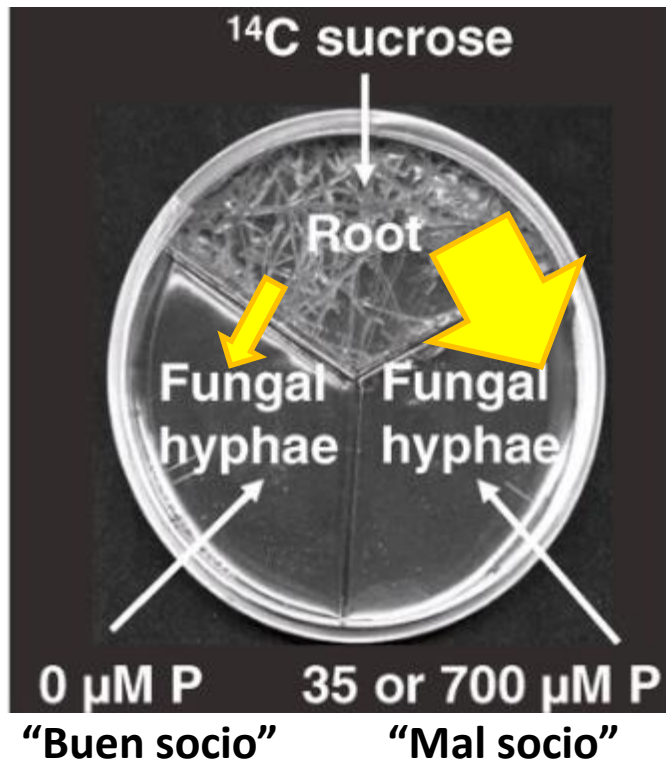
# Los transportadores se acumulan en la membrana periarbuscular (PAM)



Las membranas periarbusculares están llenas de transportadores para facilitar el intercambio de nutrientes: compuestos de fosfato y nitrógeno en el hongo y azúcares de la célula de la planta.

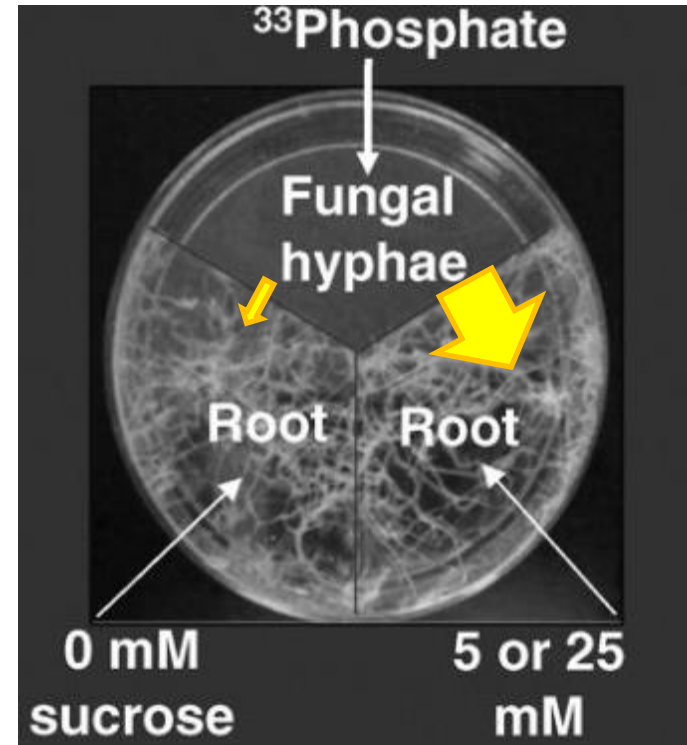
Pumplin, N. and Harrison, M.J. (2009). Live-cell imaging reveals periarbuscular membrane domains and organelle location in *Medicago truncatula* roots during arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Plant Physiol.* 151: [809-819](#).

# Las plantas y los hongos recompensan a los buenos socios, estabilizando el mutualismo



Dada la posibilidad de elegir entre suministrar nutrientes a un socio cooperador y otro no-cooperador, las plantas y los hongos recompensan al buen socio.

Este sistema de recompensa mutua puede explicar por qué esta simbiosis ha persistido estable durante casi medio mil millones de años



Kiers, E.T., et al., (2011). Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. *Science*. 333: [880-882](#) reprinted with permission from AAAS.



# Los hongos ectomicorrícicos a menudo forman cuerpos fructíferos (setas) cerca de los árboles



Image credits: The ecology of ectomycorrhizal fungi (21<sup>st</sup> New Phytologist Symposium Logo), reproduced with permission of the New Phytologist Trust ©2008; [Gerald Holmes](#), Valent USA Corporation, Bugwood.org; [gotofino](#)



# Muchos hongos conocidos son los cuerpos fructíferos de hongos EM



Hongos Porcini (*Boletus edulis*)



Setas Chantarelle (*Cantharellus cibarius*)



*Tuber melanosporum*



El venenoso matamoscas o falsa oronja (*Amanita muscaria*)

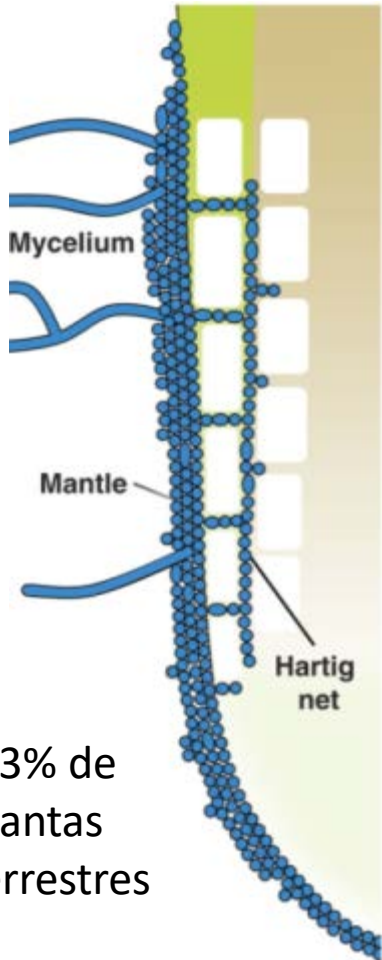
Algunos son comestibles, pero algunos NO!



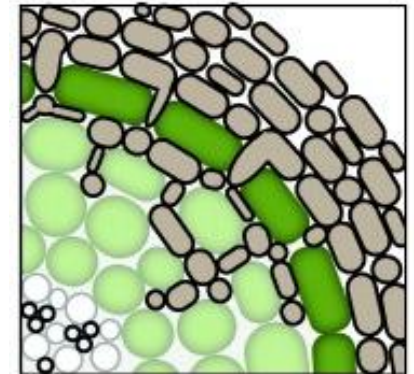
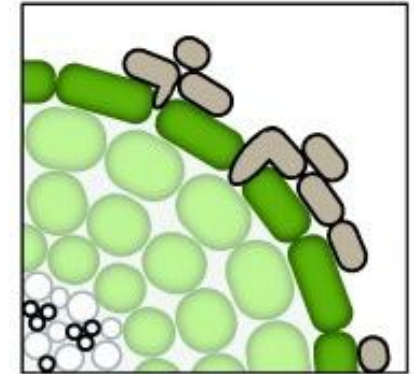
*Tuber aestivum*

Photo credits [Gerald Holmes](#), Valent USA Corporation, Bugwood.org; [moi-meme](#); [Arpingstone Strobilomyces](#) and [Strobilomyces](#).

# Los hongos de Ectomicorrízicos (EM) colonizan los espacios entre las células



Ápice radical de *Pinus nigra* colonizado por hongos ectomicorrízicos



TRENDS in Genetics

Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd. Bonfante, P., and Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nat Commun* 1: 48. Reprinted from Plett, J.M., and Martin, F. (2011). Blurred boundaries: lifestyle lessons from ectomycorrhizal fungal genomes. *Trends Genetics* 27: 14-22 with permission from Elsevier; Photo courtesy [M. Vohník](#)



# Los hongos EM son aptos para estudios moleculares



*Laccaria bicolor*



*Tuber melanosporum*

A diferencia de los hongos AM, los hongos **EM** son **simbiontes facultativos** y pueden cultivarse en el laboratorio.

Los genomas de algunos hongos EM han sido secuenciados.

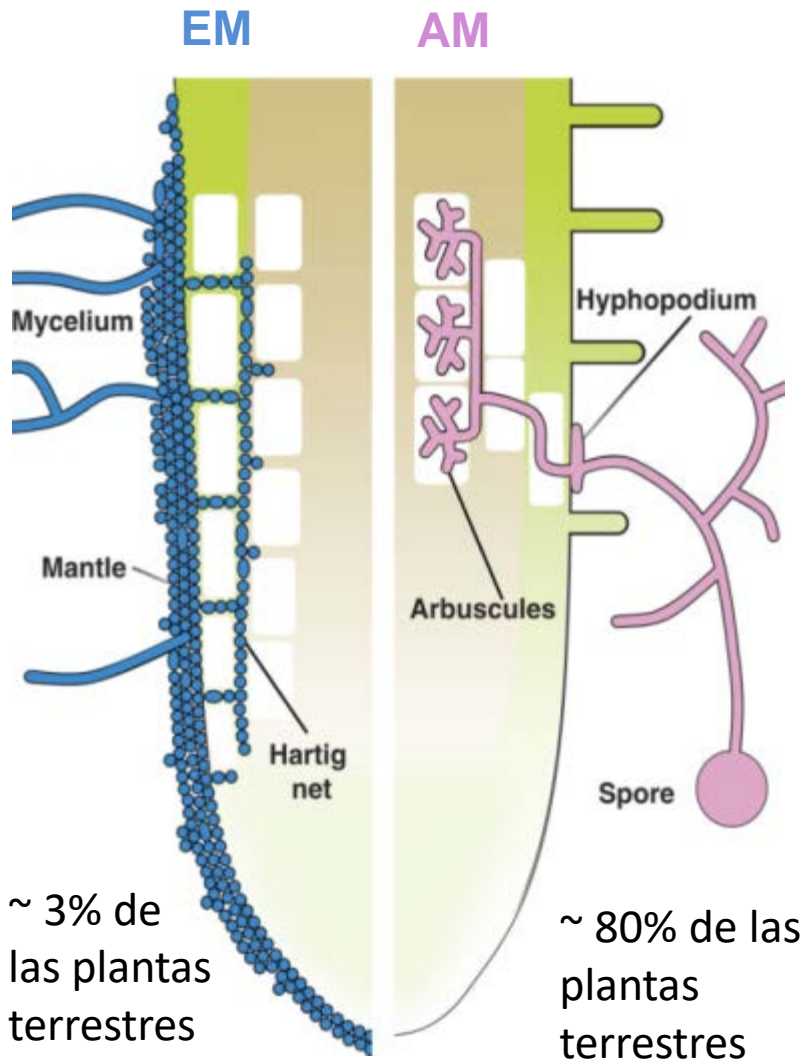
Observación interesante: fuerte reducción en las enzimas degradantes de las paredes celulares de las plantas - tal vez una adaptación a su estilo de vida simbiótico?



Los hongos ectomicorrícicos ayudan a mantener ecosistemas forestales sanos, que pueden almacenar > 100 tn C/ha!

Photo credit: [INRA](#); [moi-meme](#); [UN](#)

# Resumen – Simbiosis micorrícica



Los hongos micorrícicos mejoran la asimilación de nutrientes y agua de las plantas; la simbiosis proporciona carbohidratos a los hongos

La simbiosis con hongos AM es una simbiosis muy ampliamente distribuida

La simbiosis requiere una comunicación compleja entre la planta y el hongo

Simbiosis micorrícica arbuscular: ***"la madre de las endosimbiosis radicales de las plantas"***

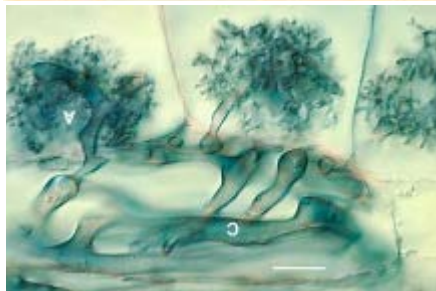
\*Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nat Rev Micro*. 6: 763-775; Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd. Bonfante, P., and Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nat Commun* 1: 48.

# Resumen

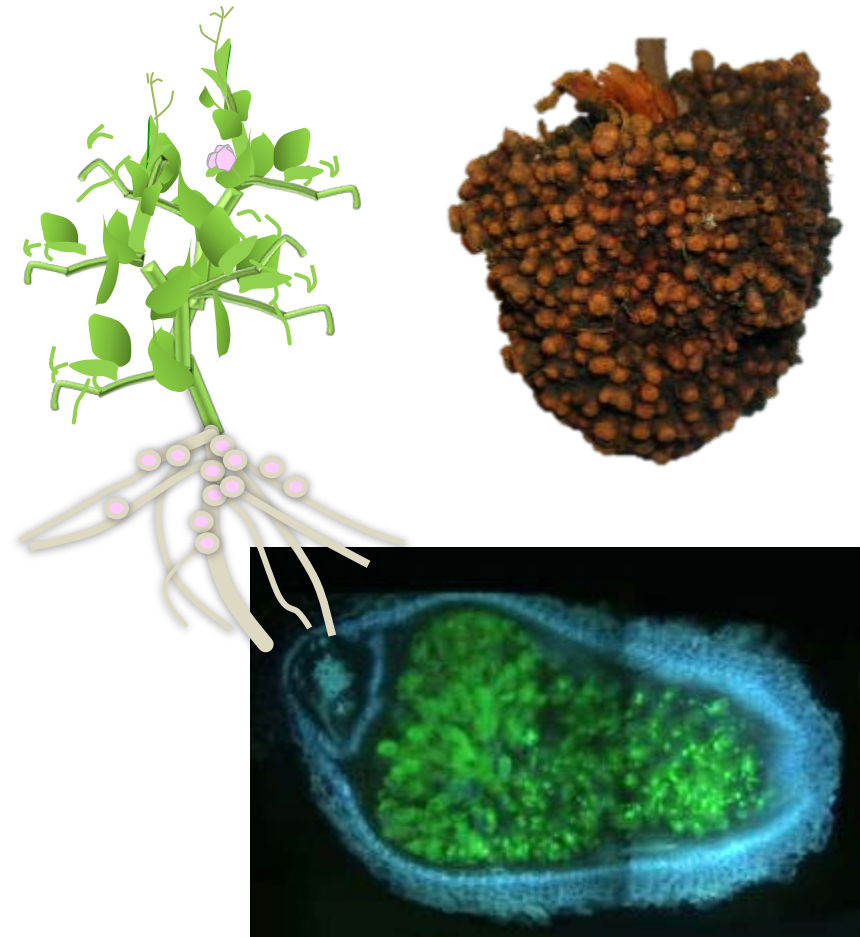


Los microorganismos simbióticos son aliados íntimos de las plantas

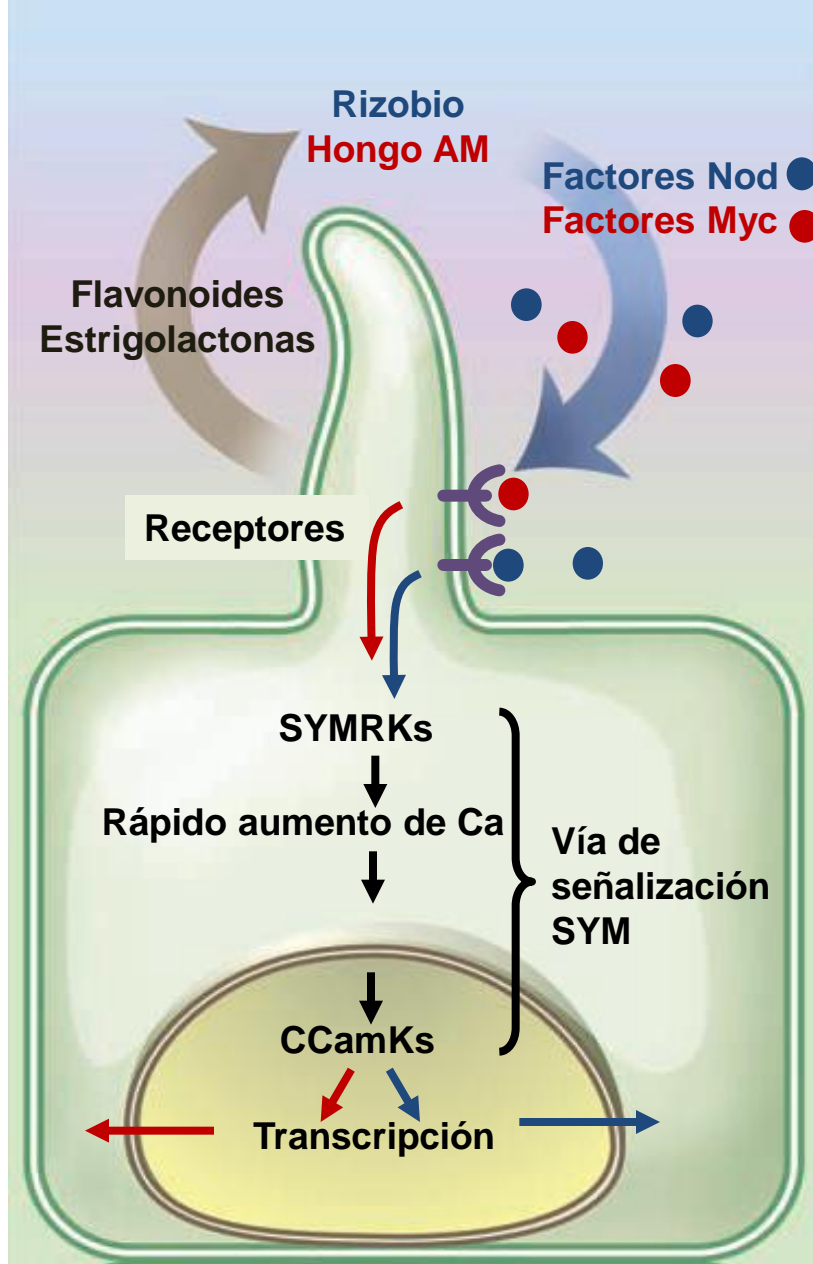
Estas simbiosis son asociaciones mutualistas en las que ambos socios se benefician



La planta utiliza una vía SYM central para simbiosis con hongos micorrícicos y rizobios



# Resumen



La vía SYM está involucrada en la simbiosis con rizobio, Frankia y hongos AM

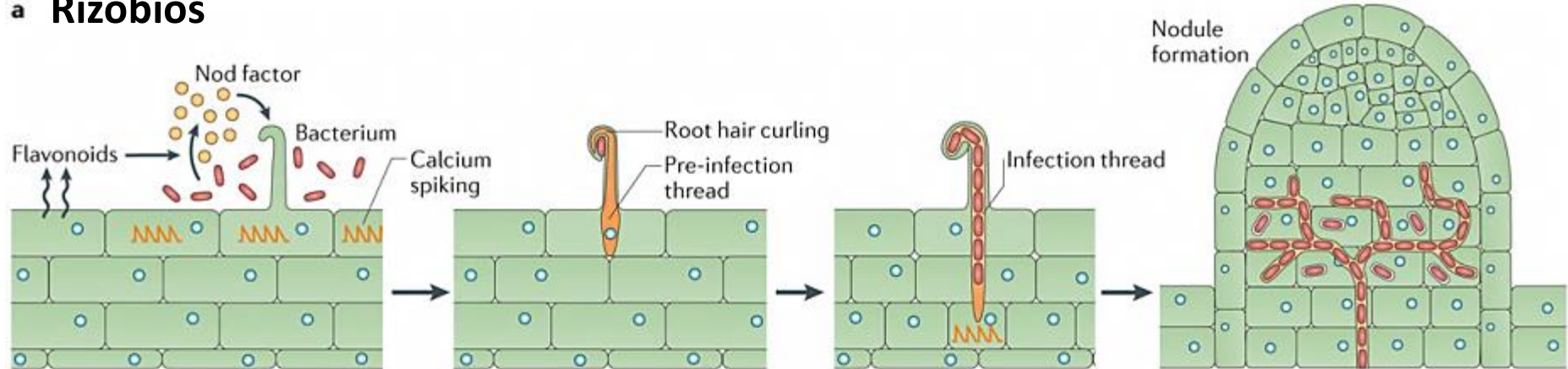
La simbiosis AM precedió a la nodulación por varios cientos de millones de años, por lo que se acepta generalmente que las vías posteriores se derivan de la vía de la simbiosis AM

Adapted from Oldroyd, G.E.D., Harrison, M.J., and Paszkowski, U. (2009). Reprogramming plant cells for endosymbiosis. *Science* 324: [753-754](#).

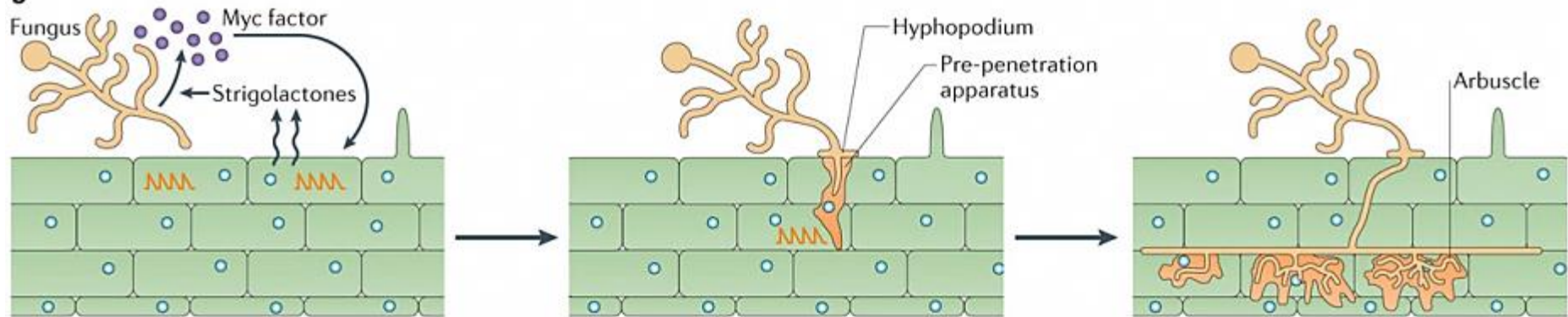


# Simbiontes de raíz - resumen

## a Rizobios



## b



## Hongos micorrícicos

Nature Reviews | Microbiology

Oldroyd, O. (2013). Speak, friend, and enter: signalling systems that promote beneficial symbiotic associations in plants. [Nat Rev Microbiol: 11.](#)

# Investigaciones en curso



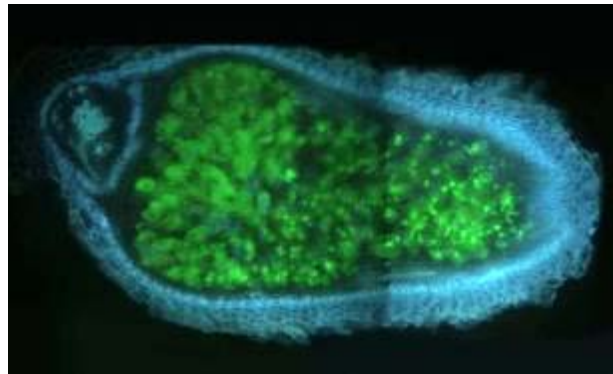
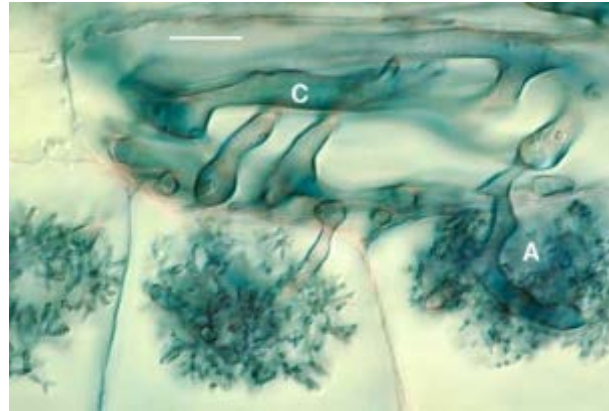
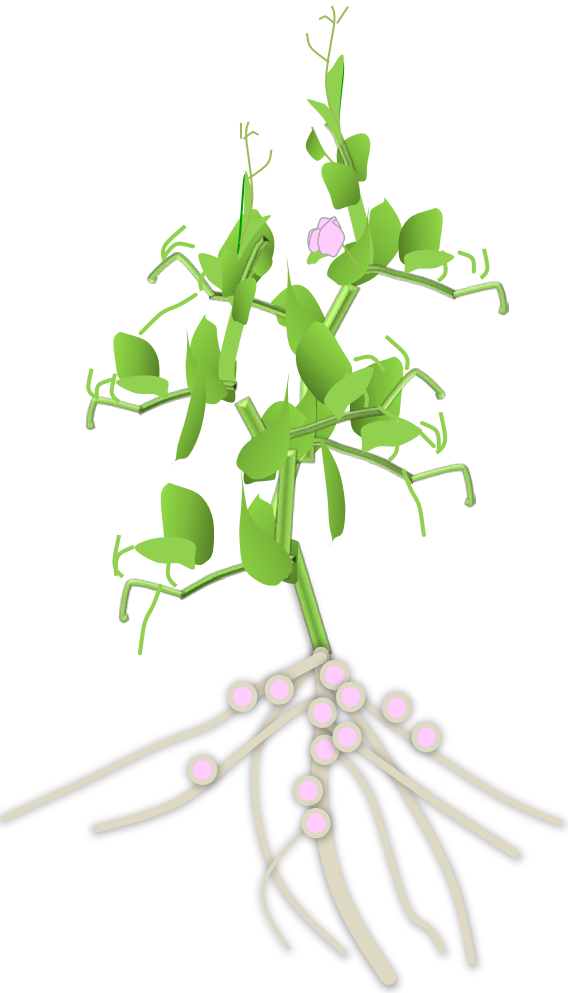
- ¿Por qué los hongos EM, pero no los hongos AM, son capaces de vivir libremente?
- ¿Cómo se comunican los hongos EM con la planta huésped y establecen la simbiosis?
- ¿Cómo se comunican los otros tipos de hongos micorrícicos y establecen la simbiosis?





# Alianzas íntimas:

## Las raíces de las plantas y los microsimbiontes



# Lectura y discusión para el martes 25/4

FUNGAL BIOLOGY REVIEWS 26 (2012) 39–60



British Mycological  
Society promoting fungal science

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/fbr](http://www.elsevier.com/locate/fbr)



## Review

## Mycorrhizal networks: Mechanisms, ecology and modelling

Suzanne W. SIMARD<sup>a,\*</sup>, Kevin J. BEILER<sup>b</sup>, Marcus A. BINGHAM<sup>a</sup>, Julie R. DESLIPPE<sup>c</sup>,  
Leanne J. PHILIP<sup>d</sup>, François P. TESTE<sup>e</sup>