

Carbono, bosques y micorrizas: una “negación de investigación imperativa”

Carlos Rojas Alvarado^{1,2} & Robin G. Doss²

¹ Laboratorio de Productos Forestales, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Universidad de Costa Rica. 11501-2060, Costa Rica. carlos.rojasalvarado@ucr.ac.cr

² Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica. 11501-2060, Costa Rica. robin.g.doss@gmail.com

(Recibido: 21 de febrero de 2014. Aceptado: 19 de agosto de 2014)

ABSTRACT. The integrated study of biological systems associated with carbon sequestration and fixation has not traditionally been a priority in the determination of protocols of carbon quantification. This case of scientific reductionism has not permitted an adequate understanding of the weight of biological interactions on the global carbon cycle. It is time for important systems of biological interaction among plants and other groups of organisms, beyond mycorrhizae, to be studied in the previously mentioned context.

RESUMEN. El estudio integrado de los sistemas biológicos asociados con el secuestro y fijación de carbono no ha sido prioritario en la determinación de los protocolos de cuantificación de este elemento. Este caso de reduccionismo científico ha permitido que no se comprenda de forma adecuada el peso de las interacciones biológicas sobre el ciclo global del carbono. Es hora que sistemas importantes de interacción biológica entre las plantas y otros grupos de organismos, como las micorrizas, se investiguen en el contexto anteriormente descrito.

KEY WORDS. Climatic change, fungi, neotropics, rizosphere, ecosystem services, Costa Rica.

El ciclo del carbono se ha conocido por muchos años. Sin embargo, no ha sido sino hasta la segunda mitad del siglo XX que se le ha dado importancia a la relación entre la cantidad de carbono en la atmósfera y aquella en los diferentes reservorios de la tierra. Después de la publicación de los primeros datos encontrados por Charles Keeling en el observatorio de carbono atmosférico de Mauna Loa a principios de los años sesenta (Harris 2010), comenzó una tendencia de investigación sobre los sumideros y el movimiento de este elemento en el planeta. Hoy en día, el problema de la acumulación de carbono atmosférico y su relación con el cambio climático en nuestro planeta es quizás el problema ambiental más importante de nuestra época (Vogt 2010). Aun así, muchos vacíos de información siguen existiendo en relación con los aspectos de mediana a pequeña escala que controlan el ciclo del carbono en la tierra.

Uno de estos aspectos es la dinámica del secuestro de carbono en los ecosistemas forestales alrededor del mundo. En los últimos años se ha avanzado en la cuantificación del flujo de carbono

hacia y desde sistemas boscosos por medio de la técnica de covarianza de torbellinos (Jung *et al.* 2011). De la misma forma, la cuantificación de carbono fijado en árboles ha sido mejorada por medio de la utilización de modelos alométricos específicos para su cálculo (Wolf *et al.* 2010). Aun así, todavía se carece de protocolos que incluyan además de lo anterior, una cuantificación de la interacción de los elementos fijadores de carbono y los demás componentes de biodiversidad en un sistema forestal dado. Este es un tema que inclusive ha sido comprendido por la agenda política internacional en relación con estudios de secuestro de carbono y cambio climático (Midgley *et al.* 2010).

En este sentido, el crecimiento de investigaciones con relación al funcionamiento de los ecosistemas proveen un marco contextual en el cual los estudios sobre el flujo de carbono intra-ecosistémico pueden analizarse desde diferentes perspectivas y a través de equipos multidisciplinarios. Sin embargo, el desarrollo de estos sistemas de estudio ambiental es obstaculizado en parte por las limitaciones

de formación de muchos profesionales y a los retos que implican los cambios curriculares y la cada vez más necesitada multidisciplinariedad (Wineburg & Grossman 2000).

En este contexto, a pesar de que se conoce que alrededor del 92% de las familias de plantas en nuestro planeta presentan asociaciones micorrícicas (Bothe *et al.* 2010 y definición en la siguiente sección) y que hasta un 20% del carbono fijado por la planta es transferido a los hongos micorrizantes (Kaschuk *et al.* 2009), el conocimiento sobre la implicación de esta asociación, especialmente en relación con sistemas forestales específicos, es todavía básico. Por ejemplo, a pesar de que la relación entre las raíces de las plantas y los hongos ha sido moderadamente estudiada desde el punto de vista ecológico (Allen 1991), es en los últimos años que se ha visto un aumento en el interés por realizar estudios de campo sobre diferentes elementos de esta relación (Bever *et al.* 2010). Hasta cierto punto, lo anterior es un producto parcial de la organización reciente de conferencias internacionales específicamente sobre este tema. Sin embargo, este aumento en el número de trabajos sobre el tópico también se debe al desarrollo de técnicas de muestreo molecular (e.g. Gamper *et al.* 2010) y al avance en el conocimiento taxonómico de los hongos en las últimas décadas. De igual forma, la creciente demanda por aplicaciones forestales en donde medie la interacción de los árboles con otros elementos en el ecosistema en un marco de desarrollo sostenible también ha jugado un papel importante en esta tendencia.

En Costa Rica, por ejemplo, la mayoría de trabajos micológicos hasta el momento se han centrado en la identificación de las formas fúngicas y la publicación de libros que incluyen datos provenientes de estos trabajos (Mata 2003; Mata *et al.* 2003; Chaverri *et al.* 2010) más que en las implicaciones de la interacción entre los hongos y otros organismos. Lo mismo se puede decir de la investigación forestal, la cual se ha centrado en la silvicultura (Piotto *et al.* 2010) y en el estudio tecnológico de la madera (Carpio Malavassi 2003) y no en el rol de los integrantes de los ecosistemas sobre los procesos forestales. Por ejemplo, la funcionalidad ecológica de la relación raíz-hongo está siendo promovida apenas muy recientemente en el país (Hertel *et al.* 2011). Esto no es sorprendente ya que aun a nivel internacional, es apenas en los últimos años que algunas iniciativas forestales han

incorporado la investigación micorrícica en su agenda productiva y de reforestación (Bâ *et al.* 2010). Es por ello, que el estudio cuantitativo de la relación raíz-hongo ha sido inclusive llamado una "negación de investigación imperativa" (Alexander & Selosse 2009).

A pesar de lo anterior, un gran número de esfuerzos de investigación han tomado forma en diferentes sistemas forestales en el mundo. Estos proyectos se centran desde aspectos meramente productivos en plantaciones (Zangaro *et al.* 2009) hasta el análisis de la dinámica trófica en sistemas agroforestales (Pindi 2011), praderas (van der Heiden 2010) y bosques tropicales (Courty *et al.* 2011). En el Neotrópico, algunos estudios han investigado también el efecto de prácticas humanas (Pagano & Cabello 2011) y desastres naturales (Vargas *et al.* 2010) sobre la relación raíz-hongo. Estos trabajos muestran la tendencia más o menos reciente de estudio de procesos funcionales de ecosistemas en el contexto de los servicios ofrecidos por los mismos. Inclusive, algunas de las bases teóricas del enfoque de servicios ecosistémicos y capital natural también han sido estudiadas recientemente (Bailey 2011).

La relación micorrícica en el contexto del mercado de carbono. El mercado de carbono es un esquema económico internacional que ha ganado popularidad en la última década, en parte a raíz de la creación del protocolo de Kioto a finales de los años noventa (Bonne *et al.* 2002). En países como Costa Rica, este diseño ha sido tomado en cuenta para la creación de instituciones reguladoras (i.e. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal) creadas por ley (Ley Forestal No.7575, publicada el 16 de abril de 1996). Sin embargo, como ha sido argumentado en años recientes, la estimación de carbono secuestrado por bosques – proceso inherente al mercado de carbono– sufre de limitaciones técnicas que comprometen la seriedad científica del esquema de cálculo (Townsend *et al.* 2011). Es por ello que el estudio de la dinámica del flujo energético que determina el secuestro y fijación de carbono es actualmente un tópico de interés alrededor del mundo.

Dentro de esta tendencia de enfoque, Townsend *et al.* (2011) recuerdan que hay un número alto de regulaciones multiescala, especialmente a nivel de interacción interespecífica, que están directamente relacionadas con el proceso de secuestro de carbono. Un grupo de estas relaciones se produce a través de la multiplicidad

de organismos presentes en la rizosfera. Sin embargo, debido a las limitaciones logísticas relacionadas con el estudio de microorganismos (ver Nowrousian, 2010 para una revisión de las técnicas actualmente usadas), el abordaje del tema desde esta perspectiva es todavía algo complicado. A pesar de lo anterior, el grupo de los hongos micorrícicos, es decir, aquellos que presentan una relación funcional estrecha con las raíces de las plantas – incluyendo árboles – han empezado a ser estudiados con el objeto de cuantificar su aporte en los diferentes ciclos naturales (Ostle *et al.* 2009). Este estudio también ha derivado en el análisis de la relación micorrícica y su vínculo con servicios básicos del ecosistema (Gianinazzi *et al.* 2010).

Si se analizan las implicaciones de la relación raíz-hongo en un contexto funcional ecosistémico, es fácil observar que su estudio es un ejemplo de reduccionismo científico desde una perspectiva socioeconómica y cultural. Por ejemplo, es casi de común acuerdo que la presencia de bosques –sean estos naturales o concebidos antropogénicamente– tiene un valor intrínseco que eleva la calidad de vida humana (Secretariat of the Convention on Biological Diversity 2001). Esta apreciación se puede observar desde acuerdos internacionales como los Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas; hasta Constituciones Políticas, como es el caso de Costa Rica (artículo 50, Constitución Política de Costa Rica de 1949). En tiempos modernos inclusive, es casi imposible desligar el aporte que tienen los bosques en términos de secuestro y fijación de carbono y la relación de este fenómeno con otros aspectos como la mitigación del cambio climático (Pan *et al.* 2011).

La anterior forma de tratar el tema valora el hecho de que los bosques cumplen papeles muy

importantes para el soporte del estilo de vida moderno. Sin embargo, existe un sinnúmero de otros roles boscosos normalmente inadvertidos por la mayoría de las sociedades humanas y que en conjunto se pueden denominar servicios del ecosistema. Estos últimos están relacionados con la facilitación o mantenimiento de aspectos como la captación y retención de agua, la protección del suelo, el soporte de la biodiversidad y la mitigación de fenómenos ambientales globales y locales. Debido al trasfondo social, económico y cultural relacionado con el uso – especialmente en el futuro – de los recursos naturales, es que el estudio de los servicios del ecosistema es considerado prioritario en diferentes ámbitos del conocimiento humano (Ostrom 2009).

En este marco de trabajo, la relación biológica raíz-hongo representa un sistema con el cual no solamente se puede estudiar la biología de ambos componentes bióticos, sino su vínculo con la productividad forestal, el mercado de carbono y el beneficio socio-cultural recibido por las poblaciones humanas. La implicación práctica de esta estrategia de estudio y bioalfabetización se fortalece cuando la misma se lleva a cabo en el contexto de dos aspectos importantes de las ciencias ambientales modernas: la cuantificación de los servicios del ecosistema y la implementación de la sostenibilidad. En el caso de Costa Rica, dentro de los planes de desarrollo nacional (Estrategia Nacional de Cambio Climático – ENCC), y aquellos internacionales adoptados que toman en cuenta la funcionalidad ecosistémica (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation – REDD), el estudio de interacciones entre los árboles y su entorno biótico – por supuesto más allá de las micorrizas – debería de ser no una negación sino una realidad de investigación imperativa.

LITERATURA CITADA

- Alexander, I. & Selosse, M.A. 2009. Mycorrhizas in tropical forests: a neglected research imperative. *New Phytologist* 182(1):1-3.
- Allen, M.F. 1991. The ecology of mycorrhizae. New York, EEUU. Cambridge University Press.
- Bailey, J.K. 2011. From genes to ecosystems: a genetic basis to ecosystem services. *Population Ecology* 53(1):47-52.
- Bâ, A., A.G. Diédhiou, Y. Prin, A. Galiana & Duponnois, R. 2010. Management of ectomycorrhizal symbionts associated to useful exotic tree species to improve reforestation performances in tropical Africa. *Annals of Forest Science* 67(3):301.
- Bever, J., I.A. Dickie, E. Facelli, J. Facelli, J. Klironomos, M. Moora, M., Rilling, W. Stock, M. Tibbett & M. Zobel, M. 2010. Rooting theories of plant community ecology in microbial interactions. *Trends in Ecology & Evolution* 25(8):468-478.
- Bonne, R., M. Carey & A. Peterson. 2002. Protecting terrestrial ecosystems and the climate through a global climate market. *In*: Swingland, I. (ed.). Capturing carbon and conserving biodiversity: the market approach (pp 309-331). Londres, Reino Unido. Earthscan Publications Ltd.
- Bothe, H., K. Turnau & M. Regvar. 2010. The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in protecting endangered plants and habitats. *Mycorrhiza* 20: 445-457.
- Carpio Malavassi, I.M. 2003. Maderas de Costa Rica: 150 especies forestales. 2a edición. San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Chaverri, P., S. Huhndorf, J. Rogers & G. Samuels. 2010. Microhongos comunes de Costa Rica y otras regiones tropicales. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Editorial INBio.
- Courty, P.E., F. Walder, T. Boller, K. Ineichen, A. Wienkem, A. Rousteau & M.A. Selosse 2011. Carbon and Nitrogen Metabolism in Mycorrhizal Networks and Mycoheterotrophic Plants of Tropical Forests: A Stable Isotope Analysis. *Plant Physiology* 156:952-961.
- Gamper, H.A., M.G.A van der Heijden & G.A. Kowalchuk. 2010. Molecular trait indicators: moving beyond phylogeny in arbuscular mycorrhizal ecology. *New Phytologist* 185(1):67-82.
- Gianinazzi, S., A. Gollote, M.N. Binet, D. van Tuinen, D. Redecker & D. Wipf. 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza* 20(8):519-530.
- Harris, D.C. 2010. Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO₂ Measurements. *Analytical Chemistry* 82:7865-7870.
- Hertel, D., L. Köhler & M.C. Rillig. 2011. Mycorrhizal, Endophytic and Ecomorphological Status of Tree Roots in the Canopy of a Montane Rain Forest. *Biotropica* 43(4):401-404.
- Jung, M., M. Reichstein, H.A. Margolis, A. Cescatti, A.D. Richardson, M.A. Arain, A. Arneth, C. Bernhofer, D. Bonal, J. Chen, D. Gianelle, N. Gobron, G. Kiely, W. Kutsch, G. Lasslop, B.E. Law, A. Lindroth, L. Merbold, L. Montagnani, E. J. Moors, D. Papale, M. Sottocornola & C. Vaccari Williams. 2011. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research* 116: G00J07.
- Kaschuk, G., T.W. Kuyper, P.E. Leffelaar, M. Hungria & K.E. Giller. 2009. Are the rates of photosynthesis stimulated by the carbon sink strength of rhizobial and arbuscular mycorrhizal symbioses?. *Soil Biology and Biochemistry* 41(6):1233-1244.
- Nowrousian, M. 2010. Next-Generation Sequencing Techniques for Eukaryotic Microorganisms: Sequencing-Based Solutions to Biological Problems. *Eukaryotic Cell* 9(9):1300-1310.
- Mata, M. 2003. Macrohongos de Costa Rica. Vol.1. 2a Edición. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Editorial INBio.
- Mata, M., R.E. Halling & G.M. Mueller. 2003. Macrohongos de Costa Rica. Vol.2. 2a Edición. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica: Editorial INBio.
- Midgley, G.F., W.J. Bond, V. Kapos, K. Ravilious, J.P. Scharlemann & F.I. Woodward. 2010. Terrestrial carbon stocks and biodiversity: key knowledge gaps and some policy implications. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2(4):264-270.
- Ostle, N.J., P. Smith, S. Fisher, F.I. Woodward, J.B. Fisher, J.U. Smith, D. Galbraith, P. Levy, P. Meir, N.P. Macnamara & R. D. Bardgett. 2009. Integrating plant-soil interactions into global carbon cycle models. *Journal of Ecology* 97:851-863.
- Ostrom, E. 2009. A General Framework for

- Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*325(5939):419-422.
- Pagano, M. & M.N. Cabello. 2011. Mycorrhizal Interactions for Reforestation: Constraints to Dryland Agroforest in Brazil. ISRN Ecologydoi:10.5402/2011/890850.
- Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J. E. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, D. A. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch & D. Hayes. 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*333(6045):988-933.
- Pindi, P.K. 2011. Mycorrhizal association of some agroforestry tree species in two social forestry nurseries. *African Journal of Biotechnology*10(51):10425-10430.
- Piotto, D., D. Craven, F. Montagnini & F. Alice. 2010. Silvicultural and economic aspects of pure and mixed native tree species plantations on degraded pasturelands in humid Costa Rica. *New Forests* 39(3):369-385.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2001. *The Value of Forest Ecosystems* (CBD Technical Series no. 4). Montreal, Canadá: SCBD.
- Townsend, A.R., C.C. Cleveland, B. Z. Houlton, C.B. Alden & J.W.C. White. 2011. Multi-element regulation of the tropical forest carbon cycle. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9:9-17.
- Van der Heiden, M.G.A. 2010. Mycorrhizal fungi reduce nutrient loss from model grassland ecosystems. *Ecology* 91(4): 1163-1171.
- Vargas, R., N. Hasselquist, E.B. Allen & M.F. Allen. 2010. Effects of a Hurricane Disturbance on Aboveground Forest Structure, Arbuscular Mycorrhizae and Belowground Carbon in a Restored Tropical Forest. *Ecosystems*13(1): 118-128.
- Vogt, M. 2010. Climate Justice. In: Ritson, K. & A. Kneitz (eds.). *RCC Perspectives* (pp. 3-28). Munich, Alemania: Rachel Carson Center for Environment and Society.
- Wineburg, S. & P. Grossman. 2000. *Interdisciplinary Curriculum: Challenges to Implementation*. Nueva York, EEUU: Teachers College Press.
- Wolf, A., P. Ciais, V. Bellassen, N. Delbart, C.B. Field & J.A. Berry. 2010. Forest biomass allometry in global land surface models. *Global Biogeochemical Cycles*25: GB3015.
- Zangaro, W., M.A. Nogueira, G. Andrade. 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi used as biofertilizers in revegetation programmes. In Rai, M. (ed.). *Advances in fungal biotechnology* (pp. 351-378). Nueva Dehli, India: IK International Publishing House Pvt. Ltd.