Artículo invitado

Monitoreo de servicios ecosistémicos en un observatorio de cafetales agroforestales. Recomendaciones para el sector cafetalero*

Olivier Roupsard, Clémentine Allinne, Karel Van den Meersche, Philippe Vaast, Bruno Rapidel, Jacques Avelino, Christophe Jourdan, Guerric Le Maire, Jean-Marc Bonnefond, Jean-Michel Harmand, Jean Dauzat, Alain Albrecht, Tiphaine Chevallier, Bernard Barthès, Anne Clément-Vidal, Federico Gómez-Delgado, Fabien Charbonnier, Laura Benegas, Kristen Welsh, Rintaro Kinoshita, Rémi Vézy, Junior Pastor Pérez-Molina, John Kim, Simon Taugourdeau, Elsa Defrenet, Jérôme Nespoulous, Florian Rançon, Florian Guidat, Aurélie Cambou, Maxime Soma, Carolin Mages, Florian Schnabel, Iván Prieto, Delphine Picart, Maxime Duthoit, Alain Rocheteau, Frédéric Do, Elias de Melo Virginio Filho, Rachida Moussa, Yves Le Bissonnais, Christian Valentin, Ricardo Sánchez-Murillo, Catherine Roumet, Alexia Stokes, Lee Vierling, Jan Eitel, Erwin Dreyer, Laurent Saint-André, Anders Malmer, Denis Loustau, Marney Isaac, Adam Martin, Anders Priemé, Bo Eberling, Mikael Madsen, Alfonso Robelo, Diego Robelo, Carlo Borgonovo, Peter Lehner, Guillermo Ramírez, Manuel Jara, Rafael Acuña Vargas, Alejandra Barquero, Carlos Fonseca, Frédéric Gay[1]

RESUMEN

Ocho años de estudio de la ecofisiología del café, a través de experimentación y de modelación y el monitoreo de los servicios del ecosistema (SE) en una gran finca cafetalera en Costa Rica, revelaron varias recomendaciones prácticas para los agricultores y los formuladores de políticas. El sistema de cultivo estudiado dentro de nuestro observatorio colaborativo (Coffee-Flux), corresponde a un sistema agroforestal (SAF) a base de café bajo la sombra de grandes árboles de *Erythrina poeppigiana* (16% de la cubierta del dosel). Una gran cantidad de SE y limitantes dependen de las propiedades locales del suelo (en este caso Andisoles), especialmente de la erosión/infiltración, el agua/carbono y la capacidad de almacenamiento de nutrientes. Por lo tanto, para la evaluación de SE, el tipo de suelo es crucial. Una densidad adecuada de árboles de sombra (bastante baja aquí por la condición de libre crecimiento), redujo la severidad de las enfermedades de las hojas con la posibilidad de reducir el uso de plaguicidas y fungicidas. Un inventario simple del área basal en el collar de las plantas de café permitió estimar la biomasa subterránea y la edad promedio de la plantación, para juzgar su valor de mercado y decidir cuándo reemplazarla. Las fincas de café probablemente estén mucho más cerca de la neutralidad de C que lo indicado en el protocolo actual de C-neutralidad, que solo considera árboles de sombra, no los cafetos ni el suelo. Se proponen evaluaciones más completas, que incluyen árboles, café, hojarasca, suelo y raíces en el balance C del SAF. Los árboles de sombra ofrecen muchos SE si se gestionan adecuadamente en el contexto local. En comparación con las condiciones a pleno sol, los árboles de sombra pueden (i) reducir la erosión laminar en un factor de 2; (ii) aumentar la fijación de N y el % de N reciclado en el sistema, reduciendo así los requisitos de fertilizantes; (iii) reducir la severidad de enfermedades de las hojas; (iv) aumentar el secuestro de C; (v) mejorar el microclima y (vi) reducir sustancialmente los efectos del cambio climático. En nuestro estudio de caso, no se encontró ningún efecto negativo sobre el rendimiento del café.

Palabras clave: beneficios de la sombra, cafetales C-neutrales, fijación de nitrógeno.

* Artículo estructurado a partir de la traducción del francés del capítulo 2 "Suivi des services écosystémiques dans un obseratoire de caféiers agroforestiers. Recommandations pour la filiere du café", del libro "Agroforesterie et services Écosystémiques en zone tropicale" coordinado por Josiane Seghieri y Jean-Michel Harmand, Éditions Quae, 2019.

1 Las afiliaciones de los autores se encuentran al final de este artículo (página 163)

ABSTRACT

Eight years of studying coffee ecophysiology and monitoring ecosystem services (ES) in a large coffee farm in Costa Rica revealed several practical recommendations for farmers and policy makers. The cropping system studied within our collaborative observatory (Coffee-Flux) corresponds to a coffee-based agroforestry system (AFS) under the shade of large trees of *Erythrina poeppigiana* (16 % of canopy cover). A lot of ES and disservices depend on local soil properties (here Andisols), especially erosion/infiltration, water/carbon and nutrient storage capacity. Therefore, for ES assessment, the type of soil is crucial. An adequate density of shade trees (rather low here) reduced the severity of leaf diseases with the prospect of reducing pesticide and fungicide use. A simple inventory of the basal area at collar of the coffee plants allowed estimating the belowground biomass and the average age of the plantation, to judge of its market value and to decide when to replace it. Coffee farms are probably much closer to C neutrality than predicted by the current C-Neutral protocol, which only considers shade trees. More comprehensive assessments, including trees, coffee, litter, soil, and roots in the C balance of the AFS are proposed. Shade trees offer many ES if they are adequately managed in the local context. As compared to full sun conditions, shade trees may (i) reduce laminar erosion by a factor of 2, (ii) increase N fixation and the % of N recycled into the system, thus reducing fertilizer requirements, (iii) reduce the severity of leaf diseases, (iv) increase C sequestration, (v) improve the microclimate, and (vi) substantially reduce the effects of climate change. In our case study, no negative effect on coffee yield was found.

Keywords: shade benefits, C-neutral coffee plantations, nitrogen fixation.

INTRODUCCIÓN

El café es un cultivo perenne tropical que se cultiva en alrededor de 80 países. El consumo mundial de café supera los 9 millones de toneladas, de las cuales alrededor del 65% proviene de *Coffea arabica* L. Se estima que toda la cadena de valor del café (desde el cultivo hasta la comercialización), involucra a alrededor de 100 millones de personas en el mundo. Hoy, las normas Nama-Café[2] y C-Neutral[3] promueven métodos de cultivo que ayudan a mitigar y adaptarse al cambio climático. Cada año se publica mucha investigación exitosa sobre el café, pero no ha habido un observatorio colaborativo en fincas de productores ni en el mismo sitio, con enfoques multidisciplinarios y verticales (misma unidad de lugar y tiempo). Dicho observatorio ofrece la posibilidad de vincular varias disciplinas de investigación y tener una visión general a largo plazo de la ecofisiología del café en condiciones reales.

MATERIALES Y MÉTODOS

En 2009, Centro de cooperación internacional en investigación agronómica para el desarrollo (CIRAD, por sus siglas en francés), el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y la finca Aquiares[4] crearon su observatorio colaborativo a largo plazo "Coffee-Flux"[5] para el estudio biofísico del sistema agroforestal del café (Figura 1). La finca de Aquiares está ubicada en la cuenca del río Reventazón, en la región del Caribe Central de Costa Rica, en las coordenadas 9°56'17" (Norte) y 83°43'41" (Oeste), en la ladera del volcán Turrialba. Con certificación de carbono neutral y Rainforest AllianceTM[6], es una de las fincas más grandes de Costa Rica (6,6 km^2). La parcela principal donde se instalaron los instrumentos claves de medición (torre de flujo, venturi) está a una altitud de 1000 m, en una cuenca hidrográfica de 1 km^2.

El objetivo de Coffee-Flux es evaluar los flujos de carbono, agua, nutrientes, N_2O y erosión, así como cuantificar los servicios del ecosistema, desde la planta hasta la cuenca o la finca. Se combinan observación, experimentación, modelación y teledetección. Los datos se recopilan (Figura 2) y los modelos se calibran localmente, desde la planta hasta la parcela (ha) antes de cambiar la escala (cuenca, finca). El observatorio ha sido monitoreado desde 2009 con el fin de comprender las fluctuaciones estacionales e interanuales en la productividad del café y los servicios de los ecosistemas asociados. El observatorio Coffee-Flux ha recibido apoyo continuo de varias instituciones y proyectos, incluido el proyecto SAFSE (Compromiso entre la producción y otros servicios ecosistémicos proporcionados por los sistemas agroforestales, CIRAD/Instituto de Investigación para el Desarrollo-IRD, por sus siglas en francés).

La filosofía es concentrar varias investigaciones en un sitio específico y durante varios años, compartir una base de datos experimental común, desarrollar modelos y publicar resultados en revistas científicas de alto rango. Esta investigación colaborativa fue posible gracias a las interacciones positivas entre varias instituciones (Isaac *et al*. 2017, Kim *et al*. 2017, Martin *et al*. 2017, Prieto *et al*. 2015, Sánchez-Murillo *et al*. 2016). La investigación aplicada también ha sido fuertemente promovida (Roupsard *et al*. 2017) en agronomía, en la selección de variedades, para certificaciones C-Neutral

2 https://www.namacafe.org/
3 Certificación C-neutral Costa Rica: https://presidencia.go.cr/comunicados/2016/09/meta-de-carbononeutralidad-para-el-2021-se-mantiene-y-fortalece/
4 Cafetalera Aquiares: http://auction.stoneworks.com/includes/crq2004/aquiares_brochure.html
5 Observatorio Coffee-Flux: http://www.umr-ecosols.fr/index.php/fr/recherche/projets/53-coffee-flux
6 Rainforest-AllianceTM: https://www.rainforest-alliance.org/

Figura 1. El observatorio colaborativo CoffeeFlux en la finca de Aquiares: cafetos bajo árboles de poró (*Erythrina*) grandes, Turrialba, Costa Rica

y NAMA (Virginio Filho *et al*. 2015, Roupsard 2015). Coffee-Flux se beneficia de la infraestructura del CATIE, fácil acceso al campo y buena seguridad. La base de datos (disponible en R) acelera el intercambio de información.

Nuestro objetivo aquí es presentar los principales logros de Coffee-Flux después de ocho años de monitoreo y modelación, destacando el interés práctico para los productores de café y los tomadores de decisiones. Nos centraremos en reservas de carbono en el suelo; hidrología; erosión, fertilización, sombra y rendimiento; fertilización y flujos de N_2O; la severidad del complejo de la enfermedad de la hoja y la sombra; índice de hojas y rendimiento de café; las raíces; los efectos del sombreado en la productividad primaria de la planta de café y en su eficiencia en el uso de la luz; el balance de carbono del ecosistema; árboles de sombra y su adaptación al cambio climático.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Algunas aplicaciones prácticas de Coffee-Flux

Stock de carbono muy alto y gran variabilidad horizontal en Andisoles

La mayoría de los suelos de los cafetales en la región estudiada son Andisoles, o sus versiones más avanzadas (Ultisoles). Los primeros provienen de cenizas volcánicas depositadas regularmente, en este caso, por el volcán Turrialba. Estas cenizas evolucionan en alófanos que luego con el tiempo se convierten en arcillas para que finalmente los Andisoles se conviertan en Ultisoles.

Los Andisoles son suelos jóvenes ricos en alófanos (hasta 20%). Cuantos más alófanos hay, más fuertes son sus propiedades ándicas. Los alófanos tienen una estructura nanométrica con una superficie muy grande. Pueden atrapar mucha agua, carbono y minerales como el fósforo. Los contaminantes probablemente también se acumulan en estos suelos. El porcentaje de alófanos está altamente correlacionado con las reservas de carbono del suelo. Estas reservas son altas, del orden de 560 ± 180 t C/ha o 56 ± 18 kg C/m^2 entre 0 y 2 m (Chevallier *et al*. 2019), un orden de magnitud diez veces mayor que la biomasa aérea y subterránea evaluado en 37 t C/ha (Charbonnier *et al*. 2017; Defrenet *et al*. 2016).

Con el tiempo, los alófanos se lixivian y se transforman en una secuencia de arcillas cuyo contenido de carbono puede ser extremadamente variable a escala de finca (Kinoshita *et al*. 2016), como lo revela la espectrometría infrarroja. Dado que el porcentaje de alófanos (o la proporción de alófanos/arcillas) es el principal determinante de la variabilidad espacial de las reservas de carbono del suelo, debe entenderse antes de evaluar las reservas de este mineral en suelos de fincas o entre fincas.

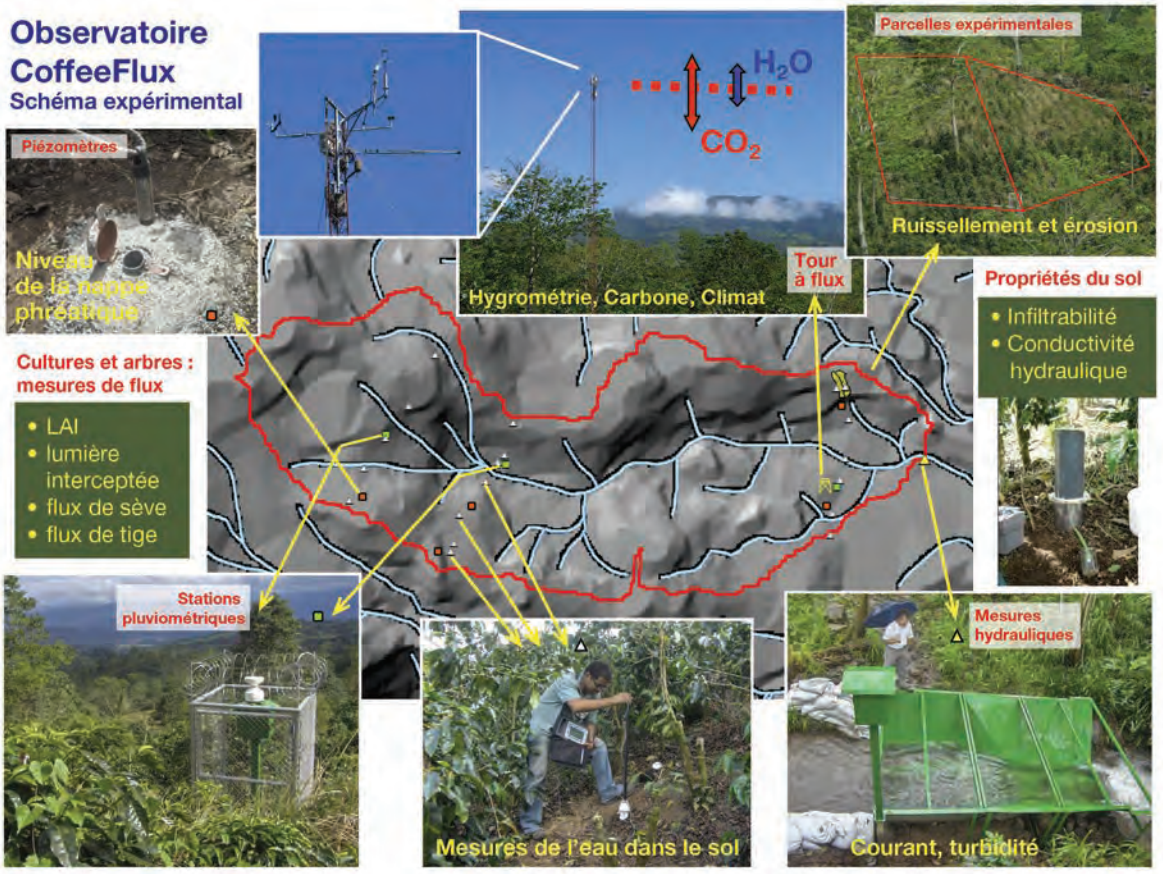

Figura 2. Dispositivo experimental de observación colaborativa de CoffeeFlux en la finca de Aquiares: medidas y modificaciones del flujo de C, H_2O, nutrientes, de la erosión y servicios ecosistémicos en un sistema agroforestal de café, Turrialba, Costa Rica

Aplicaciones prácticas
Dependiendo de la relación alófano/arcilla, los requisitos de fertilización podrían ser muy diferentes, incluso dentro de áreas pequeñas aparentemente homogéneas. Proporcionar mapas detallados de Andisoles agrícolas permitiría a los agricultores ahorrar fertilizantes y minimizar su impacto en el suelo y el agua. La espectrometría infrarroja es una herramienta prometedora para la detección de suelos de alto rendimiento.

Alta infiltrabilidad de Andisoles, el equilibrio hidrológico está controlado por el acuífero

Las parcelas de café de Aquiares, establecidas en Andisoles, infiltran aproximadamente el 92% de la lluvia (Gómez-Delgado *et al.* 2011). La escorrentía superficial dentro de las parcelas es, por lo tanto, muy baja, siendo su contribución al flujo del río de sólo un 4%. Los Andisoles son una "esponja" con un alto contenido de agua permitido por los alófanos, una alta macroporosidad, un fuerte drenaje profundo y una infiltración muy alta (>1000 mm/hora) (Benegas *et al.* 2014; Hasselquist *et al.* 2018). El flujo del río depende principalmente de los acuíferos (56%) (Gómez-Delgado *et al.* 2011), en particular a través de fuentes (Welsh *et al.* 2018).

Aplicaciones prácticas
El manejo sin labranza de plantaciones de café establecidas en Andisoles, parece beneficiar al acuífero. Sin embargo, debido a una infiltración significativa, es probable que sustancias contaminantes pasen a través del acuífero. Se recomienda controlar el nivel y la calidad de los acuíferos en tales suelos, especialmente en áreas más secas donde es probable que haya efectos de concentración.

Efecto predominante del tipo de suelo en la erosión, en comparación con la presencia de árboles de sombra

Los Andisoles exhiben baja erosión laminar, consistente con la baja escorrentía superficial medida. La producción de sedimentos en la cuenca es muy baja (alrededor de 1 t/ha/año). Muy poco sedimento (alrededor del 5%) proviene de las propias parcelas de café. Dos tercios

del sedimento proviene del lecho del río; el resto (aproximadamente 1/3) proviene de caminos y callejones ubicados entre las parcelas de café. La escorrentía es, de hecho, alta en las carreteras, causando erosión en los bordes de las parcelas. Por lo tanto, la erosión no debe considerarse a escala de parcela, sino a escala de finca con su infraestructura, o a escala de cuenca (Gómez-Delgado 2010). Sin embargo, los árboles de sombra mitigan la escorrentía y la erosión en un factor de casi dos en comparación con las parcelas a pleno sol.

Aplicaciones prácticas
La baja erosión laminar en las parcelas sobre Andisoles y el papel importante de las carreteras y los bordes de la parcela en la producción de sedimentos, lleva a recomendar la construcción de tuberías de hormigón a lo largo de los caminos para desviar la escorrentía a las parcelas donde puede infiltrarse. También es necesario proteger las orillas de los ríos como prioridad. Cualquiera sea el contexto pedológico de la finca, recomendamos realizar un estudio hidrológico rápido antes de elegir las mejores medidas contra la erosión (Gómez-Delgado 2010).

Fertilización, sombra y rendimiento
De acuerdo con los resultados preliminares, la cantidad de nitrógeno reciclado por el ecosistema es mayor a la sombra que a la luz solar directa. Los árboles de sombra estudiados aquí son poró; la tasa de reciclaje es mayor si estos árboles se podan regularmente (alrededor de 150 a 300 kg de N reciclado/ha/año) que si crecen libremente (<70 kg de N reciclado/ha/año). Cinco meses después de la poda del poró, más del 40% del nitrógeno de los residuos de la poda permanece en la hojarasca y el suelo y el 23% en los cafetos. Además, la poda parece ser la ruta esencial de la transferencia de nitrógeno del poró al café.

Bajo sombra y en Andisoles, observamos que el suelo puede dejarse sin fertilización durante aproximadamente cinco años sin una caída en el rendimiento del café, según se observó al manipular los aportes de fertilizante (0, 110 o 230 kg N/ha/año). El nitrógeno total del suelo no se vio afectado en el tratamiento de baja fertilidad, mientras que el nitrógeno mineral disminuyó en un factor de tres en el tratamiento de baja fertilización en comparación con el tratamiento de alta fertilización. La producción alterna del rendimiento (fuerte-débil) durante dos años, o bienalmente, es mayor a pleno sol (Schnabel *et al*. 2018).

Aplicaciones prácticas
La gran capacidad de almacenamiento de nitrógeno de los Andisoles permite mantener buenos rendimientos de café durante varios años, a pesar de la reducción de los aportes de fertilizantes (aquí la mitad del nivel actual de 200 kg/ha), o incluso de cero insumos. Esta información es útil cuando las condiciones económicas del productor son desfavorables en el contexto de los precios fluctuantes del café. A largo plazo, se debe ampliar los estudios de optimización de la aplicación de fertilizantes por razones de rentabilidad económica e impacto ambiental. Sin embargo, los requerimientos de fertilizantes dependen mucho del tipo de suelo. La amplia variabilidad de los suelos en la escala de la finca podría fomentar la agricultura de precisión, que consiste en ajustar la fertilización a las condiciones micro-locales, a fin de reducir el gasto total y la contaminación del agua con nitratos.

Fertilización y flujo de N_2O desde el suelo
Van den Meersche y colaboradores, midieron los flujos de N_2O desde el suelo en las parcelas de pleno sol durante un año utilizando cámaras dinámicas (mediciones continuas). Las parcelas probadas recibieron aportes de nitrógeno contrastantes (0 vs 230 kg N/ha/año), desde cuatro años antes de la medición. En las parcelas no fertilizadas, los flujos de N_2O permanecieron bajos, alrededor de 1 g de N-N_2O/ha/día. En las parcelas fertilizadas, los flujos aumentaron considerablemente: de 1 g de N- N_2O/ha/día durante la estación seca, a 2-3 g de N- N_2O/ha/día durante la estación húmeda. El valor máximo de 15 g de N- N_2O/ha/día fue alcanzado inmediatamente después de la aplicación de fertilizante con un pico estrechamente relacionado con los eventos de lluvia y con una duración de hasta dos meses. Sin embargo, menos del 1% del nitrógeno suministrado por el fertilizante se liberó como N_2O. Después de la lluvia, las altas tasas de infiltración eliminan los nitratos y conducen a una reducción de las condiciones *redox*. Por lo tanto, es más probable que el nitrógeno (N) sea eliminado del sistema del suelo que liberado como N_2O a la atmósfera.

Aplicaciones prácticas
Medimos las emisiones de N_2O significativamente más bajas que las calculadas a partir de los valores estándar del IPCC* (protocolo estándar C-neutral). Además, la optimización del suministro de fertilizantes, con cantidades más bajas y frecuencias de alimentación más altas, ayudaría aún más a reducir las emisiones de N_2O y reduciría significativamente la lixiviación potencial de nitratos.
* Panel intergubernamental de expertos en cambio climático: https://www.ipcc.ch/

El sombreado adecuado mitiga el complejo de las enfermedades en la hoja sin afectar el rendimiento

Allinne y colaboradores, establecieron un estudio factorial con dos niveles de exposición (sombreado vs pleno sol) y dos niveles de protección fitosanitaria (convencional vs protección máxima), en el que se midió la severidad (% del área foliar afectada) de cinco enfermedades foliares: *Mycena citricolor* (ojo de gallo o mancha foliar americana), *Hemileia vastatrix* (roya), *Cercospora caffeicola* (cercospora, cercosporiose, mancha de hierro), *Leucoptera coffeella* (minador) y *Phoma costaricensis* (phoma). El experimento duró tres años (2012-2014), incluida la histórica epidemia regional de roya de 2012.

La máxima protección ha reducido significativamente el impacto de las enfermedades. Cualquiera que sea el año, la exposición a la sombra o al sol no tuvo ningún efecto sobre los impactos de la roya o el minador de hoja *(L. coffeela*). Por otro lado, el sombreado redujo el impacto de la cercosporiosis (mancha de hierro), pero agravó el de ojo de gallo. En general, cuando tenemos en cuenta los efectos acumulativos de todas las enfermedades y plagas de las hojas, el sombreado redujo significativamente la severidad del complejo patológico y de plagas en un 10 a 20%. La sombra redujo tanto la carga de frutos de los cafetos, como las pérdidas de rendimiento debido a enfermedades, lo que finalmente compensó la producción. Un buen rendimiento preservado con demandas reducidas de plaguicidas-fungicidas indica la importancia de los árboles de sombra en el cultivo de café.

Aplicaciones prácticas

Si consideramos todo el complejo de bioagresores foliares del café, la sombra reduce la gravedad entre 10 a 20% sin afectar el rendimiento. La sombra adecuada puede reducir la necesidad de plaguicidas-fungicidas y mejorar la rentabilidad del cultivo de café.

El índice de área foliar de café (LAI), un indicador de servicios ecosistémicos

Se realizó una reconstrucción de la serie temporal de LAI (2001-2011) gracias a dos calibraciones sucesivas:

- La calibración del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), proveniente de una imagen satelital de alta resolución a través del LAI verdadero medido en el suelo en cada una de las capas (árboles de sombra y cafetos).
- La calibración NDVI obtenida de imágenes de Moderate resolution imaging espectrorradiómetro (MODIS) (Le Maire *et al*. 2014; Taugourdeau *et al*. 2014) con la imagen calibrada de alta resolución.

El LAI del cafeto varía estacionalmente entre 2,4 y 4,4 m^2 de hoja/m^2 de suelo con un máximo hacia el final de la estación húmeda, una fuerte disminución durante la estación seca, un mínimo después de la poda anual del café, una recuperación durante la próxima temporada de lluvias y un segundo mínimo durante el período de llenado de granos. Con MODIS, también hemos detectado variaciones interanuales significativas en LAI a partir de la poda anual o la renovación de parcelas. El LAI promedio de los árboles de sombra (poró), es de 0,67 m^2 de hoja/m^2 de suelo por año.

Correlacionamos la serie temporal del LAI del café con los registros agrícolas para examinar el impacto del manejo de parcelas en este índice y en ciertos servicios del ecosistema, en particular el rendimiento y la escorrentía superficial. La fertilización nitrogenada, que es ajustada anualmente por el agricultor, sigue siendo el mejor predictor de rendimiento. Pero al combinar la fertilización nitrogenada con LAI seis meses al año, la predicción mejora. LAI es, por lo tanto, un predictor importante de rendimiento. Este modelo puede usarse para mapear rendimientos regionales y para la reconstrucción de series temporales de rendimientos pasados.

El índice de área foliar también se ha utilizado en la modelización de servicios hidrológicos. Cuando se duplica de 3,8 a 7,6, la evapotranspiración aumenta en 60%, la escorrentía superficial disminuye en 1%, el flujo del río se reduce en 17% y la cantidad de agua que fluye a través del acuífero se reduce en 20% (Taugourdeau *et al*. 2014).

Aplicaciones prácticas

El LAI es un indicador de desempeño a nivel de finca, pero también a nivel regional. La teledetección LAI también funciona para evaluar las pérdidas de rendimiento asociadas con las pérdidas de follaje. Esta es una técnica muy prometedora para rastrear la roya y el ojo de gallo. Podría recomendarse en programas de alerta que se han desarrollado mucho recientemente, luego del histórico ataque de la roya del 2012. LAI también se puede usar para simular servicios hidrológicos.

Las raíces del cafeto representan el 50% de la biomasa
Las raíces del café crecen hasta 4 m de profundidad. La biomasa subterránea de este cultivo se puede estimar alométricamente.

Estimamos la biomasa y la productividad primaria neta (NPP) de la parcela (tanto de café como de los árboles de sombra de poró), teniendo en cuenta las raíces profundas y la posición de los cafetos en relación con los árboles. Se evaluó el crecimiento del tronco y las raíces, así como la biomasa, la renovación y la descomposición de las raíces. Los anillos de crecimiento se estudiaron en la base del tronco en rangos de tamaños de plantas de café. La biomasa de la raíz y la densidad de las raíces finas se midieron en zanjas a una profundidad de 4 m. La renovación de las raíces finas se midió mediante la extracción secuencial del suelo a lo largo de 0-30 cm para tener en cuenta la heterogeneidad del subsuelo agroforestal. Esto se realizó durante un año y en diferentes lugares (a pleno sol o debajo de los árboles, en la fila y entre filas de café) (Defrenet *et al*. 2016).

Se han propuesto relaciones alométricas para calcular la biomasa y la productividad primaria neta de las partes perennes a escala de parcela. Las relaciones lineales entre el área basal en el collar y la biomasa de los compartimentos perennes (tallos, raíces gruesas, etc.), facilitan la estimación del *stock* de carbono en la biomasa de los cafetales.

El radio en el cuello del tronco aumenta a 2,5 mm/año (estabilizado entre 12 y 44 años). El 92% de la biomasa de la raíz del cafeto se encuentra a una profundidad de 1,5 m, y solo el 8% hasta 4 m. La biomasa de las raíces perennes es de 16 t/ha y su productividad primaria neta de 1,3 t/ha/año. La biomasa de las raíces finas (a una profundidad de 0 a 30 cm), es el doble en el surco que entre surcos. La biomasa de las raíces finas es de 2,29 t/ha, o el 12% de la biomasa total de raíces. Su productividad primaria neta es 2,96 t/ha/año, ó 69% de la productividad primaria neta total de la raíz. La tasa de renovación de raíces finas es 1,3 veces/año.

El sistema de raíces de los cafetos representa el 49% de la biomasa vegetal total. Tal proporción puede ser consecuencia de la poda. Los árboles de sombra no tienen un efecto significativo sobre la biomasa de las raíces finas del cafeto, lo que sugiere que el sistema de raíces del cafeto es muy competitivo en la capa superficial del suelo (Defrenet *et al*. 2016).

Los anillos de crecimiento son anuales para cafetos en zonas húmedas sin interrupciones de crecimiento. El estudio de estos anillos de crecimiento, combinado con el inventario de la distribución del área en el collar, permite calcular la edad promedio de una parcela completa (Defrenet *et al*. 2016).

Aplicaciones prácticas
Las ecuaciones alométricas basadas en el diámetro en la base del cafeto facilitan la estimación de su biomasa subterránea y, por lo tanto, su reserva de carbono en la biomasa subterránea. Caracterizar la edad promedio de la parcela tomando en cuenta los cafetos que han sido remplazados, como se propone aquí, podría ser muy útil para estimar el vigor y la productividad de una parcela, o para normalizar las comparaciones que generalmente se hacen entre plantaciones, o incluso para evaluar el valor de una plantación dada en el mercado. Esta edad promedio también podría usarse para determinar el momento óptimo para aplicar la renovación.

Los árboles de sombra aumentan la eficiencia del uso de la luz del cafeto, lo que compensa las pérdidas en la productividad primaria neta
Los árboles de sombra de los sistemas agroforestales afectan la distribución de la luz (Charbonnier *et al*. 2013). Nuestras observaciones de campo y el modelado 3D, muestran que la luz debajo de los árboles es muy variable y modifica la fisiología del cultivo intercalado (Charbonnier *et al*. 2017). La reducción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR) se compensa, en cierta medida, por un aumento en la eficiencia del uso de la luz (LUE). La diferencia en la productividad primaria neta del café entre sombra y pleno sol se reduce así. Debido a la gran heterogeneidad espacial de los sistemas agroforestales y la falta de herramientas apropiadas, los efectos combinados de estas variables rara vez se habían analizado. Sin embargo, su estudio permite comprender los procesos fisiológicos subyacentes a la dinámica de los rendimientos (Charbonnier *et al*. 2017). En este estudio, la productividad primaria neta (NPP) en la escala de café y parcela se midió durante dos años. La radiación absorbida se ha mapeado con un modelo 3D (MAESPA): el 35% de la luz disponible sobre los cafetos llega al suelo. Esto constituye una pérdida considerable de recursos (Charbonnier *et al*. 2013). No se puede aumentar la densidad de los cafetos debido a enfermedades, pero es posible cubrir el suelo con cultivos útiles. La eficiencia del uso de la luz y la tasa

de asimilación neta se calcularon individualmente para cada cafeto. Aunque la luz disponible se ha reducido en 60% por debajo de las copas de los árboles de sombra, la eficiencia del uso de la luz del cafeto ha aumentado en 50%. La productividad primaria neta y el rendimiento de los cafetos bajo sombra, por lo tanto, se mantuvieron en un nivel alto. Al final del proyecto, se creó una base de datos que combina biomasa y productividad primaria neta de café a pleno sol o sombra. La variabilidad de la productividad primaria neta dentro de la parcela del cafeto, se explica principalmente por la edad de las plantas y por la competencia intraespecífica entre los cafetos en lugar de la presencia de árboles de sombra (Charbonnier *et al*. 2017).

Aplicaciones prácticas
Los modelos de transmisión de luz indican que el 35% de la luz disponible sobre los cafetos termina en el suelo: este importante recurso está infrautilizado y obliga a eliminar las malas hierbas. Sería aconsejable desarrollar plantas de cobertura que fijen N si fuera posible. Sin embargo, en muchas regiones, el temor a la competencia con el cafeto o las serpientes entre los surcos, son un obstáculo para esto.

La compensación de la pérdida de luz bajo los árboles de sombra con una mayor eficiencia en el uso de la luz del cafeto, aumenta la confianza en el uso de árboles de sombra. Los modelos utilizados, como Maespa, permiten calcular la competencia por la luz entre los cafetos, el sombreado más antiguo y el más joven, y calcular u optimizar los impactos de la poda y la densidad de las plantas de café en su productividad.

Gracias a los modelos, la luz absorbida por los cafetos se ha convertido en una variable continua en el espacio y el tiempo. Esto pone fin a la dicotomía sombra/luz utilizada durante mucho tiempo para describir los sistemas agroforestales. Por lo tanto, la luz se puede calcular para cada planta, independientemente de su distancia desde el árbol o su entorno de radiación. La luz absorbida puede mapearse y usarse como una covariable para cualquier otro tipo de estudio agronómico en parcelas agroforestales heterogéneas.

¿Por qué se agota el cafeto después de unos pocos años de producción? El papel del almidón

La poda de los cafetos es una acción crucial porque afecta los rendimientos y la necesidad de mano de obra. Los rebrotes de cafetos, solo son productivos durante tres años de los seis años de vida del mismo, y con altos costos laborales. ¿Por qué un período productivo tan corto?

Estudiamos los efectos de la exposición (sombra o pleno sol) y la madurez (plantas inmaduras de dos años o plantas maduras de cinco años), sobre las concentraciones de carbohidratos no estructurales (NSC), sus reservas en hojas, tallos y las existencias, así como la dinámica del almidón durante la vida de los cafetos. Utilizamos métodos analíticos clásicos y espectroscopía de reflectancia visible e infrarroja cercana (VNIRS) (Cambou *et al*. 2021).

Las variables tróficas vinculadas a la actividad de la fotosíntesis (nitrógeno, glucosa, fructosa, sacarosa), disminuyen desde las hojas, los tallos, y luego hasta la base de la planta. Por otro lado, las variables relacionadas con la estructura y las reservas de la planta (C, C:N y almidón), mostraron la tendencia opuesta, con valores más altos en los órganos de larga vida. Las concentraciones de N, glucosa y fructosa son más altas en los órganos de dos años que en los de cinco años. Esto confirma una mayor relación fuente/sumidero en ausencia de carga frutífera. El efecto de la exposición, pleno sol o sombra, es débil en las variables medidas. La espectroscopía de reflectancia visible e infrarroja cercana (VNIRS) es una herramienta prometedora, rápida y rentable para rastrear la dinámica de los carbohidratos no estructurales, particularmente el almidón.

Nuestros resultados muestran que el rebrote (temporal), se agota a pesar de que su tronco (perenne) acumula almidón. El agotamiento del rebrote proviene de la fuerte competencia entre tres grandes sumideros: los frutos, el crecimiento de los rebrotes y el almacenamiento de almidón en las partes perennes. De hecho, el cafeto es uno de los pocos arbustos cuyos rebrotes se doblan naturalmente antes de ser rechazados. Ilustra la función de "supervivencia" de los carbohidratos no estructurales en las plantas (Cambou *et al*. 2021).

Aplicaciones prácticas
Las variedades de cafetos seleccionados para acumular menos almidón en sus partes perennes, probablemente tendrán una vida útil más larga de sus brotes y, por lo tanto, años más productivos de los mismos. La VNIRS, como técnica de medición de alto rendimiento, permitirá el cribado de estas variedades.

Huella de carbono del ecosistema

¿Los cafetales ya están cerca de la neutralidad de C? Todo depende del método de cálculo.

La finca Aquiares (Costa Rica), ha evaluado sus emisiones de gases de efecto invernadero para la planta de beneficiado, los desechos y los fertilizantes. Las

emisiones anuales de 1100 t CO_2eq se compensaron financieramente, lo que fue necesario para obtener la certificación "C-Neutral" de la finca en 2016. Esta finca puede servir como piloto a nivel nacional y potencialmente a nivel regional para el futuro. Si se usan los factores de emisión del IPCC, un tercio de las emisiones de la finca se deberían a las emisiones de N_2O por el uso de fertilizantes, y así como las emisiones de CH_4 proveniente de la fermentación de la pulpa utilizada como abono.

De acuerdo con las reglas de certificación C-Neutral (escenario 1), solo los árboles de sombra en crecimiento, los bosques en crecimiento y la biomasa de la madera de café utilizada como energía reciclada para secar los granos de café, pueden considerarse sumideros de carbono de la finca. La madera reciclada para secadores, es una energía renovable que compensa gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, fertilizantes (N_2O) y desechos (CH_4) de la planta de beneficiado. Sin embargo, los cafetos y el suelo permanecen excluidos de los cálculos en este escenario 1. De hecho, el IPCC considera que los cultivos en general son neutrales en el intercambio de gases de efecto invernadero entre el ecosistema y la atmósfera.

¿Qué pasaría si el cafeto y el suelo fueran reevaluados como un sumidero?

El escenario 2 prueba esta hipótesis y considera los cafetos no como un cultivo anual estándar, sino como un árbol pequeño. Por lo tanto, el escenario 2 incluye el almacenamiento de carbono de los cafetales en crecimiento, así como en la hojarasca y el suelo. El balance de carbono se midió mediante la covarianza Eddy de las parcelas agroforestales (árboles + cafeto + hojarasca + suelo) de la finca Aquiares durante ocho años, para un almacenamiento promedio de 3,6 t C/ha/año. De esta cifra, es necesario deducir las exportaciones de fruta y madera para secar el grano (2,75 t C/ha/año), teniendo en cuenta el hecho de que la combustión de madera ya se ha contabilizado como energía renovable en el cálculo de emisiones anuales de 1100 t CO_2eq. En última instancia, el secuestro de carbono en parcelas agroforestales, teniendo en cuenta los cafetos, compensa las emisiones de fábrica+fertilizantes+residuos. Esto indica que la finca es, prácticamente, C-neutral o incluso un sumidero de carbono, si aceptamos incluir cafetos en el cálculo.

Aplicaciones prácticas

La principal diferencia entre el escenario 1 (el protocolo C-neutro estándar) y el escenario 2 es la integración de cafetos, hojarasca y suelos. El escenario 2 es ventajoso para el agricultor que pagaría menos compensación de carbono por sus emisiones porque su finca se acercaría a la neutralidad. Esto también sigue siendo compatible con el objetivo de mejorar la eficiencia de carbono de la finca para cada año sucesivo de certificación. También tendría la ventaja, a nivel de país, de acelerar el proceso de certificación C-neutral para los cafetales y posiblemente crear créditos de carbono para la venta interna o en el extranjero.

Árboles de sombra, una palanca para la adaptación al cambio climático

Hemos estudiado el potencial de la agroforestería para mitigar la temperatura del dosel de los cafetos a través de la experimentación y el modelado en el campo. La apertura del dosel de los árboles de sombra se evaluó mediante fotografía hemisférica sobre cada cafeto.

Medimos las diferencias en las variables microclimáticas entre parcelas a la sombra y aquellas a pleno sol (Soma *et al.* 2017). El sombreado reduce la temperatura máxima del aire en 1,7°C. Las hojas de café a pleno sol han mostrado temperaturas de hasta 5°C más altas que en el ambiente del aire. La reducción de la temperatura diaria promedio de la capa de cafetos sería de -0,5°C para el nivel bajo en la corona a -1,1°C para el nivel alto en la corona.

La modelación permite ajustar el sombreado para los climas actuales y futuros, independientemente de las condiciones de altitud, pendiente, exposición o microclima. Se ha propuesto una estadística simple de interés bastante genérico para predecir la temperatura del dosel del café utilizando la temperatura del aire a pleno sol, la apertura del dosel de los árboles de sombra y la fracción de luz difusa (Soma *et al.* 2017). El modelo agroforestal más sofisticado (MAESPA), permite calcular el balance radiactivo, los flujos de energía, CO_2 y H_2O en parcelas de café complejas y heterogéneas (Vézy *et al.* 2018). Aun más completo, este modelo, conjugado a un modelo de crecimiento y producción inluyendo prácticas como densidad o poda (DynaCof), permite simular varios servicios ecosistémicos en parcelas agroforestales por rotaciones completas (Vézy *et al.* 2020). Y más allá, estos sistemas se pueden comprobar bajo escenarios de cambio climático (Vézy *et al.* 2019).

Aplicaciones prácticas
Confirmamos que la agrosilvicultura es una opción interesante para mitigar los efectos del aumento de la temperatura en el rendimiento, además de otras alternativas como la selección de variedades mejoradas. Las herramientas de modelado ayudarán a ajustar el sombreado a las condiciones locales (altitud, pendiente, exposición y radiación).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados interdisciplinarios a largo plazo de una finca de café en tiempo real, muestran que el manejo de los cafetos puede ser más eficiente a futuro en función del flujo de la energía, el agua, los nutrientes y los servicios del ecosistema en general. Se recomienda un mejor acoplamiento entre la investigación, la extensión, los proyectos de desarrollo y la experiencia de los agricultores para guiar la inversión, en aras de la rentabilidad económica y el uso adecuado del medio ambiente. Debido a sus muchas virtudes resaltadas en este estudio, se recomienda mantener una sombra adecuada sobre el cultivo de café, con un ajuste a nivel de finca o incluso de condición del terreno. El modelado puede respaldar este manejo.

Se recomienda que los proyectos de desarrollo no se basen únicamente en reglas generales, sino que dediquen parte de su presupuesto a la verificación local de estas reglas. Una inversión mínima en conocimientos científicos al comienzo y al final de los proyectos debería mejorar su impacto.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro estudio es parte del observatorio Coffee-Flux, desarrollado por CIRAD, CATIE y Cafetalera Aquiares. El sitio Coffee-Flux pertenece a la red de observatorios SOERE F-ORE-T, que cuenta con el respaldo anual de Ecofor, Allenvi y la infraestructura nacional de investigación ANAEE-F (http://www.anaee-france.fr/fr/). Coffee-Flux fue apoyado por el proyecto europeo Cafnet (EuropAid / 121 998 / C / G), el proyecto Ecosfix (ANR-2010-STRA-003-01), el proyecto Safse (Cirad/IRD) y el proyecto Macacc (ANR-13-Agro-0005). Estamos en deuda con la familia Barquero y con Alexis Pérez por su asistencia en el campo y Patricia Leandro por el uso de las instalaciones de laboratorio de suelos del CATIE.

BIBLIOGRAFÍA

Benegas, L; Ilstedt, U; Roupsard, O; Jones, J; Malmer, A. 2014. Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. Agriculture, Ecosystems & Environment 183:185-196.

Cambou, A; Thaler, P; Clement-Vidal, A; Barthès, B; Charbonnier, F; Van den Meersche, K; Aguilar, MH., Avelino, J; Davrieux, F; Labouisse, JP; De Melo Virginio Filho, E; Deleporte, P; Brunet, D; Lehner, P; Roupsard, O; 2021. Concurrent starch accumulation in stump and high fruit production in coffee (*Coffea arabica*). Tree Physiology. Final corrections submitted for Major Revisions, April 2021.

Charbonnier F; Le Maire G; Dreyer E; Casanoves F; Christina M; Dauzat J; Eitel J.U.H; Vaast P; Vierling L.A; Roupsard O. 2013. Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (*Coffea arabica* L.) agroforestry system. Agricultural and Forest Meteorology 181:152-169.

Charbonnier, F; Roupsard, O; Le Maire, G; Guillemot, J; Casanoves, F; Lacointe, A; Vaast, P; Allinne, C; Audebert, L; Cambou, A; Clement-Vidal, A; Defrenet, E; Duursma, RA; Jarri, L; Jourdan, C; Khac, E; Leandro, P; Medlyn, BE; Saint-Andre, L; Thaler, P; Van Den Meersche, K; Aguilar, AB; Lehner, P; Dreyer, E. 2017. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. Plant Cell and Environment 40(8):1592-1608.

Chevallier, T; Fujisaki, K; Roupsard, O; Guidat, F; Kinoshita, R; Viginio, ED; Lehner, P; Alain, A. 2019. Short-range-order minerals as powerful factors explaining deep soil organic carbon stock distribution: the case of a coffee agroforestry plantation on Andosols in Costa Rica. Soil 5:315-332.

Defrenet, E; Roupsard, O; Van Den Meersche, K; Charbonnier, F; Pastor Pérez-Molina, J; Khac, E; Prieto, I; Stokes, A; Roumet, C; Rapidel, B; De Melo Virginio Filho, E; Vargas, VJ; Robelo, D; Barquero, A; Jourdan, C. 2016. Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica: effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. Annals of Botany 118(4):833-851.

Gómez-Delgado, F. 2010. Hydrological, ecophysiological and sediment processes in a coffee agroforestry basin: combining experimental and modelling methods to assess hydrological environmental services. Thèse de doctorat. Montpellier, France, SupAgro; École doctorale Systèmes intégrés en biologie, agronomie, géosciences, hydrosciences, environnement. 254 p.

Gómez-Delgado, F; Roupsard, O; Le Maire, G; Taugourdeau, S; Pérez, A; Van Oijen, M; Vaast, P; Rapidel, B; Harmand, J-M; Voltz, M; Bonnefond, J-M; Imbach, P; Moussa R. 2011. Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. Hydrology and Earth System Sciences 15:369-392.

Hasselquist, NJ; Benegas, L; Roupsard, O; Malmer, A; Ilstedt U. 2018. Canopy cover effects on local soil water dynamics in a tropical agroforestry system: Evaporation drives soil water isotopic enrichment. Hydrological Processes 32(8):994-1004.

Isaac, ME; Martin, AR; de Melo Virginio Filho, E; Rapidel, B; Roupsard, O; Van den Meersche, K. 2017. Intraspecific trait variation and coordination: root and leaf economics spectra in coffee across environmental gradients. Frontiers Plant Science 8:1196.

Kim, JH; Fourcaud, T; Jourdan, C; Maeght, JL; Mao, Z; Metayer, J; Meylan, L; Pierret, A; Rapidel, B; Roupsard, O; de Rouw, A; Sánchez, MV; Wang, Y; Stokes A. 2017. Vegetation as a driver of temporal variations in slope stability: The impact of hydrological processes. Geophysical Research Letters 44(10):4897-4907.

Kinoshita, R; Roupsard, O; Chevallier, T; Albrecht, A; Taugourdeau, S; Ahmed, Z; Van Es, HM. 2016. Large topsoil organic carbon variability is controlled by Andisol properties and effectively assessed by VNIR spectroscopy in a coffee agroforestry system of Costa Rica. Geoderma 262:254-265.

Le Maire, G; Rançon, F; Charbonnier, F; Roupsard, O. 2014. Characterizing the structure of a coffee agroforestry systems in Costa Rica (póster). *In* Pleiades days (1-3 avril 2014. Toulouse, France). Disponible en https://agritrop.cirad.fr/574309/1/document_574309.pdf

Martin, AR; Rapidel, B; Roupsard, O; Van Den Meersche, K; Virginio ED; Barrios M; Isaac ME. 2017. Intraspecific trait variation across multiple scales: the leaf economics spectrum in coffee. Functional Ecology 31(3):604-612.

Prieto, I; Roumet, C; Cardinael, R; Dupraz, C; Jourdan, C; Kim, JH; Maeght JL; Mao, Z; Pierret, A; Portillo, N; Roupsard, O; Thammahacksa, C; Stokes, A. 2015. Root functional parameters along a land-use gradient: evidence of a community-level economics spectrum. Journal of Ecology 103(2):361-373.

Roupsard, O. 2015. La utilización de modelos para apoyar la validación de Innovaciones Agroforestales. *In* Diseño de Piloto de Sistemas Agroforestales en el ámbito de la Nama-Café Costa Rica. (9 dic. 2015. Turrialba, Costa Rica) (Presentación oral).

Roupsard, O; Van Den Meersche, K; Alline, C; Vaast, P; Rapidel, B; Avelino, J; Jourdan, C; Le Maire, G; Bonnefond, JM; Harmand, JM; Dauzat, J; Albrecht, A; Chevallier, T; Gómez-Delgado, F; Charbonnier, F; Benegas, L; Welsh Unwala, KE; Kinoshita, R; Vézy, R; Pérez Molina, JP; Kim, J; Defrenet E, S; Nespoulous, J; Cambou, A; Soma, M; Mages, C; Schnabel, F; Prieto Aguilar, I; Picart, D; Duthoit, M; Rocheteau, A; Do, F; De Melo Virginio Filho, E; Moussa, R; Le Bissonnais, Y; Sánchez-Murillo, R; Roumet, C; Stokes, A; Vierling, L; Eitel, J; Dreyer, E; Saint-André, L; Malmer, A; Loustau, D; Isaac, ME; Martin, A; Priémé, A; Elberling, B; Madsen, M; Robelo, A; Robelo, D; Borgonovo, C; Lehner, P; Ramírez, LG; Jara, M; Acuna Vargas, R; Barquero, A; Fonseca, C; Gay, F. 2017. Eight years studying ecosystem services in a coffee agroforestry observatory. Practical applications for the stakeholders. *In* World Coffee summit. (31st May- 3rd June 2017. El Salvador). Invited oral presentation.

Sánchez-Murillo, R; Birkel, C; Welsh, K; Esquivel-Hernández, G; Corrales-Salazar, J; Boll, J; Brooks, E; Roupsard, O; Sáenz-Rosales, O; Katchan, I; Arce-Mesén, R; Soulsby, C; Araguás-Araguás, LJ. 2016. Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources. Quaternary Science Reviews 131(Part B):250-261.

Schnabel, F; Virginio, ED; Xu, S; Fisk, ID; Roupsard, O; Haggar, J. 2018. Shade trees: a determinant to the relative success of organic versus conventional coffee production. Agroforestry Systems 92: 1535-1549.

Soma, M; Vézy, R; Deswarte, C; De Melo Virginio Filho, E; Guilioni, L; Le Maire, G; Avelino, J; Roupsard, O. 2017. A simple model to predict the effect of Agroforestry on coffee canopy temperature. Agricultural and Forest Meteorology. (En preparation).

Taugourdeau, S; Le Maire, G; Avelino, J; Jones, JR; Ramírez, LG; Quesada, MJ; Charbonnier, F; Gómez-Delgado, F; Harmand, J-M; Rapidel, B; Vaast, P; Roupsard, O. 2014. Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. Agriculture, Ecosystems & Environment 192:19-37.

Vézy, R; Christina, M; Roupsard, O; Nouvellon, Y; Duursma, R; Medlyn, B; Soma, M; Charbonnier, F; Blitz-Frayret, C; Stape, JL; Laclau, JP; Virginio, ED; Bonnefond, JM; Rapidel, B; Do, FC; Rocheteau, A; Picart, D; Borgonovo, C; Loustau, D; Le Maire, G. 2018. Measuring and modelling energy partitioning in canopies of varying complexity using MAESPA model. Agricultural and Forest Meteorology 253-254:203-217.

Vézy, R; Le Maire, G; Charbonnier, F; Christina, M; Georgiou, S; Imbach, P; Hidalgo, HG; Alfaro, E; Blitz-Frayret, C; Laclau, JP; Duursma, RA; Medlyn, B; Lehner, P; Loustau, D; Roupsard, O. 2019. DynA_Cof, a new dynamic crop model for growth, yield, carbon, water, energy balances and ecosystem services: application to coffee agroforestry. *In* 4th Wolrd Congress on Agroforestry. Oral presentation, Le Corum Conference Centre Montpellier, France.

Vézy, R; Le Maire, G; Christina, M; Georgiou, S; Imbach, P; Hidalgo, HG; Alfaro, EJ; Blitz-Frayret, C; Charbonnier, F; Lehner, P; Loustau, D; Roupsard, O. 2020. DynACof: A process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems. Environmental Modelling & Software 124.

Virginio Filho, E de M; Arrieta, S; Escobedo Aguilar, A; Rapidel, B; Roupsard, O. 2015. Validación de Piloto de Sistemas Agroforestales en el ámbito de la Nama-Café Costa Rica (Propuesta para ejecución en 2016). Anexo 2. CATIE, Cirad, Fundecooperacion, Icafe, MAG. 30 p.

Welsh, K; Boll, J; Sánchez-Murillo, R; Roupsard, O. 2018. Isotope hydrology of a tropical coffee agroforestry watershed: Seasonal and event-based analyses. Hydrological Processes 32(13):1965-1977.

AFILICIONES DE LOS AUTORES

Adam Martin
DPES, University of Toronto, Scarborough, Canada
adam.martin@utoronto.ca

Alain Albrecht
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
alain.albrecht@ird.fr

Alain Rocheteau
Cirad, IRD, Universite Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
alain.rocheteau@ird.fr

Alejandra Barquero
Hacienda Aquiares, Costa Rica
alebarquero2@gmail.com

Alexia Stokes
Cirad, Inra, UMR-Amap, Montpellier, France
alexia.stokes@cirad.fr

Alfonso Robelo
Hacienda Aquiares, Costa Rica

Anne Clément-Vidal
Cirad, UMR-AGAP, Montpellier, France
anne.clement-vidal@cirad.fr

Anders Malmer
Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Suede
anders.malmer@slu.se

Anders Priemé
University Copenhagen, Copenhagen, Danemark
aprieme@bio.ku.dk

Aurélie Cambou
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
Agrocampus Ouest, UPSP EPHor, Angers, France
aurelie.cambou5@gmail.com

Bernard Barthès
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
bernard.barthes@ird.fr

Bo Eberling
University Copenhagen, Copenhagen, Danemark
be@ign.ku.dk

Bruno Rapidel
Cirad, Ciheam-Iamm, Inra, Montpellier SupAgro, Université de Montpellier, UMR-System, Montpellier, France;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica
bruno.rapidel@cirad.fr

Carlo Borgonovo
Hacienda Aquiares, Costa Rica
cborgonovo4@gmail.com

Carlos Fonseca
Icafe, Costa Rica
cfonseca@icafe.cr

Carolin Mages
University Copenhagen, Copenhagen, Danemark
fmz403@alumni.ku.dk

Catherine Roumet
CNRS, Cefe UMR-5175, Montpellier, France
catherine.roumet@cefe.cnrs.fr

Christian Valentin
IRD, UMR-IEES, Paris, France
christian.valentin@ird.fr

Christophe Jourdan
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
Inra, Montpellier SupAgro, UMR-Lisah, France
christophe.jourdan@cirad.fr

Clémentine Allinne
Cirad, Ciheam-Iamm, Inra, Montpellier SupAgro, Université de Montpellier, UMR-System, Montpellier, France;
Catie, Programa de agricultura, ganadería y agroforestería, Turrialba, Costa Rica
clementine.allinne@cirad.fr

Delphine Picart
Inra, UMR-Ispa, Bordeaux, France
delphine.deshors-picart@inra.fr

Denis Loustau
Inra, UMR-ISPA, Bordeaux, France
denis.loustau@inra.fr

Diego Robelo
Hacienda Aquiares, Costa Rica
drobelo@aquiares.com

Elias de Melo Virginio Filho
Catie, 7170 Turrialba, Costa Rica;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica
eliasdem@catie.ac.cr

Elsa Defrenet
Agrocampus Ouest, Rennes, France
elsa.defrenet@gmail.com

Erwin Dreyer
Inra, UMR-EEF, Inra-Nancy, France
erwin.dreyer@inra.fr

Fabien Charbonnier
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
Catie, 7170 Turrialba, Costa Rica;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica;
El Colegio de la Frontera Sur, SCddc, Chiapas, México
charbonnier@ecosur.mx

Federico Gómez-Delgado
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
ICE - Costa Rican Institute of Electricity, Costa Rica;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica;
World Meteorological Organization (WMO), Costa Rica
eduardogranados30@gmail.com

Frédéric Do
Cirad, IRD, Universite Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
frederic.do@ird.fr

Frédéric Gay
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica
frederic.gay@cirad.fr

Florian Guidat
Cirad, IRD, Universite Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
florian.guidat22@gmail.com

Florian Rançon
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
florian.rancon@ims-bordeaux.fr

Florian Schnabel
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica;
FENR, University of Freiburg, Allemagne
florian.schnabel@idiv.de

Guerric Le Maire
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
guerric.le_maire@cirad.fr

Guillermo Ramírez
Hacienda Aquiares, Costa Rica
guiller2151@yahoo.es

Iván Prieto
CNRS, Cefe UMR-5 175, Montpellier, France
ivan.prieto@cefe.cnrs.fr

Jacques Avelino
Cirad, Universite de Montpellier, UPR-Bioagresseurs, Montpellier, France; Catie, Programa de agricultura, ganadería y agroforestería, Turrialba, Costa Rica
jacques.avelino@cirad.fr

Jan Eitel
University of Idaho, Etats-Unis
jeitel@uidaho.edu

Jean Dauzat
Cirad, Inra, UMR-Amap, Montpellier, France
jean.dauzat@cirad.fr

Jean-Marc Bonnefond
Inra, UMR-ISPA, Bordeaux, France
jean-marc.bonnefond@inra.fr

Jean-Michel Harmand
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
Icraf (World Agroforestry) Nairobi, Kenya
jean-michel.harmand@cirad.fr

Jérôme Nespoulous
Cirad, Inra, UMR-Amap, Montpellier, France
jerome.nespoulous@cirad.fr

John Kim
Cirad, Inra, UMR-Amap, Montpellier, France
jkim@bgc-jena.mpg.de

Junior Pastor Pérez-Molina
Catie, 7170 Turrialba, Costa Rica;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica;
Federal University of Vicosa, Brazil;
Montpellier SupAgro, Montpellier, France
jpastorpm@gmail.com

Karel Van den Meersche
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
Catie, 7 170 Turrialba, Costa Rica;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica
karel.van_den_meersche@cirad.fr

Kristen Welsh
Catie, 7170 Turrialba, Costa Rica; University of Idaho, Etats-Unis kristen.unwala@ub.edu.bs

Laurent Saint-André
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
Inra, UR-BEF, Nancy, France
st-andre@nancy.inra.fr

Laura Benegas
Catie, 7170 Turrialba, Costa Rica; Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Suède
Laura.Benegas@slu.se,
laura.benegas@catie.ac.cr

Lee Vierling
University of Idaho, États-Unis ;
Catie, 7170 Turrialba, Costa Rica
leev@uidaho.edu

Manuel Jara
Hacienda Aquiares, Costa Rica
manueljaraq@yahoo.es

Marney Isaac
DPES, University of Toronto, Scarborough, Canada
marney.isaac@utoronto.ca

Maxime Duthoit
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
maxime.duthoit@cirad.fr

Maxime Soma
Cirad, IRD, Universite Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
UR-Ecologie des Forets Mediterraneennes, Inra, Avignon, France
maxime.soma@inra.fr

Mikael Madsen
University Copenhagen, Copenhagen, Danemark
Mikael.Madsen@jur.ku.dk

Olivier Roupsard
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
Catie, 7170 Turrialba, Costa Rica;
PCP Agroforestry MesoAmerica, Catie, Costa Rica;
LMI IESOL (IRD/Isra/Ucad/Cirad), Dakar, Sénégal
olivier.roupsard@cirad.fr

Peter-Hans Lehner
Hacienda Aquiares, Costa Rica
peterhanslehner@gmail.com

Philippe Vaast
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France;
Icraf (World Agroforestry) Nairobi, Kenya
philippe.vaast@cirad.fr

Rachida Moussa
Inra, Montpellier SupAgro, UMR-Lisah, Montpellier France
moussa@supagro.inra.fr

Rafael Acuña Vargas
Hacienda Aquiares, Costa Rica
racuna@aquiares.com

Rémi Vézy
Universite de Bordeaux, Bordeaux, France; Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
remi.vezy@inra.fr , remi.vezy@cirad.fr

Ricardo Sánchez-Murillo
UNA, Stable Isotope Research Group, Costa Rica
ricardo.sanchez.murillo@una.cr

Rintaro Kinoshita
Cornell University, Etats-Unis
rk422@cornell.edu

Simon Taugourdeau
Cirad, UMR-Selmet, Montpellier, France
simon.taugourdeau@cirad.fr

Tiphaine Chevallier
Cirad, IRD, Université Montpellier, Inra, Montpellier SupAgro UMR-Eco&Sols, Montpellier, France
tiphaine.chevallier@ird.fr

Yves Le Bissonnais
Inra, Montpellier SupAgro, UMR-Lisah, Montpellier, France
lebisson@supagro.inra.fr