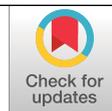


CONDUCTANCIA HIDRÁULICA FOLIAR EN ACCESIONES DE LA COLECCIÓN NÚCLEO DE *Coffea* SP. Y PROGENIES DE LA VARIEDAD CENICAFÉ 1

José Ricardo Acuña Zornosa *, Cristian David Camilo **, Carlos Andrés Unigarro Muñoz *,
Natalia Catalina Flechas Bejarano *

Acuña, R., Camilo, D. C., Unigarro, C.A., & Flechas, N. (2023). Conductancia hidráulica foliar en accesiones de la colección núcleo de *Coffea* sp. y progenies de la variedad Cenicafé 1. *Revista Cenicafé*, 74(2), e74203. <https://doi.org/10.38141/10778/74203>



Estudios con *Coffea arabica* L. cultivado a la sombra y a plena exposición solar han demostrado que la conductancia hidráulica de la hoja de café (K_F) es el principal impedimento para maximizar el intercambio gaseoso en las hojas y su tasa fotosintética. Diversidad de estudios evolutivos en plantas superiores validan la correlación positiva entre la conductividad hidráulica foliar (K_F) y la fotosíntesis. La colección núcleo de germoplasma de *Coffea* sp. de Cenicafé representa, en gran medida, la variabilidad genética y fenotípica de la colección colombiana de café, sin embargo, las diferencias entre las accesiones en términos de conductancia hidráulica foliar son desconocidas; por lo tanto, aun no es posible su uso para cruzamientos enfocados al desarrollo de progenies de café con mayores valores de conductancia. En este proyecto se midió la conductancia foliar de 42 accesiones de la colección núcleo de germoplasma de *Coffea* sp. y ocho progenies de la variedad Cenicafé 1, usando el método del flujo evaporativo. Los valores de K_F reportados fueron estadísticamente significativos, demostrando que hubo agrupamiento entre las accesiones. Las accesiones CCC16, CCC50, CCC82, CCC176, CCC427, CCC1011, CCC1045 y CCC1131 fueron clasificadas dentro del grupo de conductancia foliar muy alta. Las K_F de las ocho líneas de la variedad Cenicafé 1 se clasificaron dentro del grupo de conductancia muy alta (25%), alta (37,5%) y moderada (37,5%). Ninguna de las progenies de la variedad Cenicafé 1 fue clasificada en el grupo de conductancia baja, lo cual es muy relevante para el desempeño fotosintético de esta variedad.

Palabras clave: conductancia vegetal, diversidad genética, flujo evaporativo, germoplasma de café, Cenicafé, Colombia.

LEAF HYDRAULIC CONDUCTANCE IN ACCESSIONS FROM THE CORE COLLECTION AND PROGENIES OF THE VARIETY CENICAFÉ 1

Studies involving *Coffea arabica*, grown under varying shade levels and sun exposure, have consistently highlighted leaf hydraulic conductance (K_F) as a crucial obstacle to maximizing gas exchange and photosynthetic rate. Extensive research in plant evolution has substantiated the positive relationship between leaf hydraulic conductivity and photosynthesis. The core collection of *Coffea* sp. germplasm, curated by Cenicafé, effectively encapsulates the genetic and phenotypic diversity within the Colombian coffee collection. Yet, the variations in leaf hydraulic conductance among the accessions within this core collection remain unexplored. Consequently, leveraging this genetic resource for the purpose of breeding coffee progenies with enhanced conductance traits has remained a challenge. In this project, the leaf conductance of 42 accessions from the core collection of *Coffea* sp. and eight progenies derived from the Cenicafé 1 variety was qualified utilizing the evaporative flow method. The K_F values reported in this research yield statistically significant findings, revealing distinct groupings among the accessions. Notably, accessions CCC16, CCC50, CCC82, CCC176, CCC427, CCC1011, CCC1045 and CCC1131 exhibited remarkably high leaf conductance. The K_F of the 8 lines of the Cenicafé 1 variety showcased a range of leaf conductance levels, spanning from very high (25%), to high (37.5%) and moderate (37.5%). Importantly, none of the progeny from the Cenicafé 1 variety fell within the low conductance category, underscoring the significance of these findings for enhancing the photosynthetic performance of this coffee variety.

Keywords: plant conductance, genetic diversity, evaporative flux, coffee germplasm, Cenicafé, Colombia.

* Investigador Científico III, Investigador Científico II y Asistente de Investigación, respectivamente. Disciplina de Fisiología Vegetal, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0001-6935-2264>, <https://orcid.org/0000-0002-7344-3211>, <https://orcid.org/0000-0002-3080-4988>, respectivamente.

** Investigador Científico I hasta 31 mayo de 2022. Disciplina de Fisiología Vegetal, Cenicafé



El café (*Coffea arabica* L.) es un árbol perenne, con hojas hipoestomáticas, que ha evolucionado en el sotobosque africano y se considera una especie adaptada a la sombra (Tatagiba et al., 2010). Sin embargo, las nuevas variedades de esta especie de café crecen bien sin sombra e incluso superan en rendimiento de café a las variedades de sombra (Kumar & Tieszen, 1980). Con concentraciones de CO₂ atmosférico y luz saturada, *C. arabica* muestra una baja tasa fotosintética (4-11 mol CO₂ m⁻² s⁻¹) (Mosquera et al., 1999; Franck et al., 2006; Silva et al., 2004; Zapata et al., 2017), que está en el rango más bajo registrado para los árboles (Ceulemans & Saugier, 1993). En estudios realizados con *C. arabica* cultivado a la sombra y a plena exposición solar, Martins et al. (2014), demostraron que la conductancia hidráulica de la hoja (K_F) es el principal impedimento para maximizar el intercambio gaseoso en las hojas y su tasa fotosintética. Diversidad de estudios evolutivos en plantas superiores, incluyendo especies de importancia agrícola, han validado la correlación positiva entre la conductividad hidráulica foliar (K_F) y la tasa de fotosíntesis (Brodribb et al., 2007; Brodribb & Buckley, 2018; Machado et al., 2021). La colección núcleo de germoplasma de *Coffea* sp. del Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) está compuesta por cerca de 50 accesiones silvestres y semisilvestres de *Coffea* sp. y representa, en gran medida, la variabilidad genética y fenotípica de toda la colección colombiana de germoplasma del café (Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2017, 2018, 2019 y 2020). Sin embargo, las diferencias entre las accesiones en términos de conductancia hidráulica foliar son desconocidas, motivo por el cual su potencial uso para generar cruzamientos genéticos, enfocados al desarrollo de progenies de café con mayores valores de conductancia, aún no es posible. Tampoco se conoce si existe variación de este rasgo fisiológico entre las progenies de la variedad Cenicafé 1. En este estudio se calculó la K_F

de 42 accesiones de la colección núcleo de germoplasma de café y de ocho progenies de la variedad Cenicafé 1, con el objetivo de conocer la variabilidad fenotípica de este rasgo.

MATERIALES Y METODOS

Localización y material vegetal

La fase de campo de la investigación se realizó en la Estación Experimental de Paraguacito ubicada en el municipio de Buenavista-Quindío (04°23' N y 75°44' W a 1.203 m de altitud). Las plantas fueron sembradas en diciembre de 2016 en parcelas, cada una compuesta por 32 plantas. Las muestras biológicas fueron recolectadas entre julio 1 de 2021 y mayo 31 de 2022. De acuerdo al registro meteorológico de la estación climática instalada en el lugar, durante los 11 meses la temperatura mínima fue 17,4°C y la máxima de 29,6°C; el promedio de la radiación fotosintéticamente activa fue 113,634 μmol m⁻² s⁻¹, el acumulado de lluvias fue 2.569 mm y el promedio de humedad relativa fue 82%. Por accesión de *Coffea* sp. y por cada progenie de Cenicafé 1, se recolectaron cuatro ramas plagiotrópicas del tercio superior de la planta, luego estas fueron inmediatamente llevadas al laboratorio de Fisiología en Cenicafé Planalto, ubicado en el municipio de Manizales, Caldas (05°00' N y 75°36' W a 1.310 m de altitud).

Determinación de la conductancia hidráulica foliar (K_F) en hojas de *Coffea* sp.

La K_F de cada accesión de *Coffea* sp. y cada progenie de la variedad Cenicafé 1 se calculó mediante el método de flujo evaporativo (Sack & Scofoni, 2012). La K_F se calculó midiendo la relación entre el flujo hídrico a través de la hoja y su fuerza motriz, representada en el gradiente hídrico entre el peciolo y el sitio de evaporación (potencial hídrico) usando la ecuación <1> fórmula de Wu et al. (2020).

$$K_F = E / A * (0 - Y) \quad <1>$$

Donde, K_F = Conductancia hidráulica foliar ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$); E = Flujo hídrico (mmol/s); A = Área de la hoja (m^2); Y = Potencial hídrico de la hoja (MPa).

Semanalmente y hasta completar todas las accesiones y las ocho progenies de Cenicafé 1, se recolectaron cuatro ramas plagiotrópicas, de cada una de las cuatro plantas escogidas aleatoriamente por acesión, y el extremo inferior de cada rama se colocó dentro de un tubo de polietileno con 10 mL de agua ultrapura desgasificada. Los tubos con las ramas se dispusieron dentro de una bolsa plástica negra con toallas de papel húmedas en su interior. Las muestras biológicas se transportaron al laboratorio y se sumergieron en un recipiente con agua ultra pura y desgasificada durante la noche. Al día siguiente y una vez las muestras se hidrataron por lo menos 12 h, se verificó que el potencial hídrico de las hojas de cada rama estuviera entre -0,3 y 0,0 MPa. En este caso, se seleccionaron ocho hojas del 4° o 5° par de cada rama, partiendo del ápice de la rama, que estuvieran sanas y sin aparentes deficiencias nutricionales y, bajo el agua, por cada hoja se realizó un corte transversal del peciolo e inmediatamente se conectó a un extremo de un tubo de silicona de forma que no ingresara aire al sistema. El otro extremo del tubo se conectó a una probeta graduada de 10 mL con agua ultra pura, la cual estaba sobre el plato de una balanza analítica (AB265-S/FACT, Mettler Toledo, Greifensee, Switzerland; $\pm 10 \mu\text{g}$). La hoja, conectada al tubo y con la superficie adaxial hacia arriba, se colocó encima de un ventilador y bajo una fuente de luz activa, ligeramente por encima del nivel del menisco de agua de la probeta graduada. Entre la fuente de luz y la superficie de la hoja se interpuso una bandeja de vidrio con agua para absorber el calor de la lámpara y se

mantuvo la temperatura entre 24°C y 26°C con recambio del agua (Figura 1).

Por cada hoja, los datos de flujo hídrico se obtuvieron automáticamente de la balanza cada 30 segundos y el cálculo de la tasa de flujo hídrico (E) se realizó con el promedio de 10 medidas hechas después de 20-30 minutos, cuando el coeficiente de variación del flujo fuera menor del 5%. La hoja se retiró del sistema y se detuvo su transpiración durante 20 minutos, colocándola en una bolsa plástica sellable en la que, previamente, se había exhalado el CO_2 en su interior. Luego, se midió el potencial hídrico (Y) con una cámara de presión de Scholander (Modelo 600, PMS Instruments, OR, USA). Finalmente se calculó el área de la hoja (A) con un escáner y un software de procesamiento de imágenes (Schneider et al., 2012). La conductancia (K_F) se calculó con la Ecuación <1> y se expresó en $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$. Dado que la temperatura se mantuvo controlada en $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, los datos para el cálculo de K_F no fueron corregidos por temperatura.

Análisis de la información

El análisis descriptivo fue realizado usando gráficos de caja, promedio, mediana y desviación estándar para cada acesión. La clasificación de las accesiones y las ocho progenies de la variedad Cenicafé 1 fue realizada con base en ubicación de sus promedios con respecto a distribución por cuantil general de la variable K_F , agrupándolas en grupos de conductancia según su K_F . Los datos calculados en cada acesión y de las progenies de Cenicafé 1 fueron analizados mediante un modelo anidado completamente aleatorio, usando sumas de cuadrados del Tipo II en el análisis de varianza (AOV). Las 42 accesiones y las ocho progenies de Cenicafé 1 fueron anidadas en cada grupo de conductancia. Las comparaciones múltiples post hoc se realizaron

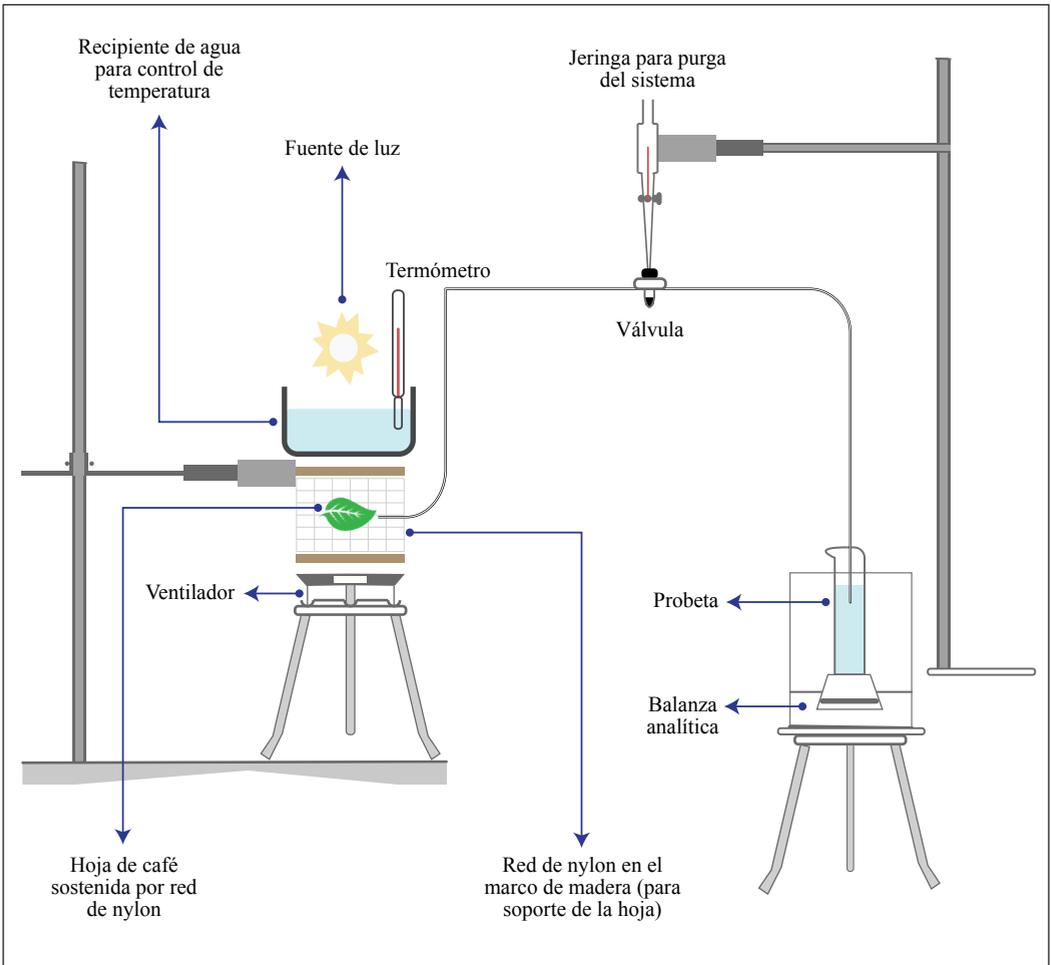


Figura 1. Esquema del montaje instrumental para la determinación del flujo evaporativo en hojas de *Coffea* sp. Los detalles del procedimiento se describen en el texto.

con la prueba estadística REGWQ (Prueba de Ryan / Einot y Gabriel / Welsch) para los grupos de conductancia donde la prueba F del AOV presentó diferencias estadísticas. Los supuestos de normalidad (Prueba de Shapiro-Wilks) y homogeneidad de varianza (Prueba de Levene) fueron cumplidos en el AOV. Los paquetes “ggplot2”, “rstatix”, “stats” y “mutoss” del software R (R Development Core Team, 2010) fueron usados para el análisis de los datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El agua es el compuesto más abundante en las células vegetales, por lo que mantener un medio acuoso estable es crucial para los procesos fisiológicos de las plantas. La atmósfera es la fuente de CO₂, necesario para la fotosíntesis; sin embargo, suele ser bastante seca, lo que provoca una pérdida neta de agua por evaporación, principalmente a

través de las hojas. Para satisfacer la demanda de absorción de CO₂ y minimizar la pérdida de agua, las plantas deben equilibrar esta pérdida con el transporte de agua desde el suelo. Esta tasa de transpiración está determinada principalmente por la difusión de vapor de la hoja y el déficit de presión de vapor entre la hoja y la atmósfera, y la eficiencia del transporte de agua a través de la hoja se define como conductancia hidráulica de la planta. Aunque las distancias que el agua debe atravesar dentro de las hojas son pequeñas en relación con la ruta suelo-planta-atmósfera, las hojas constituyen el mayor cuello de botella para el transporte de agua, contribuyendo significativamente a determinar la conductancia de la planta (Xiong & Nadal, 2020). Por lo tanto, gran número de estudios en las últimas décadas se concentran en el transporte de agua a través de la hoja, demostrando una directa correlación entre la conductancia hidráulica foliar (K_F) y el rendimiento fotosintético

(Brodrribb & Buckley, 2018; Scoffoni et al., 2016; Xiong & Nadal, 2020).

En las Tablas 1 y 2 se describen los valores de conductancia hidráulica foliar de las 42 accesiones y las 8 progenies de la variedad Cenicafé 1 evaluadas, de acuerdo al método del flujo evaporativo descrito en la metodología. Las accesiones y progenies de Cenicafé 1 se clasificaron en cuatro grupos mediante la distribución por cuartil de la variable K_F. Los cuatro grupos quedaron conformados así: baja (K_F ≤ 0,96 mmol m⁻² s⁻¹ MPa⁻¹); moderada (K_F= entre 0,96 y 1,60 mmol m⁻² s⁻¹ MPa⁻¹); alta (K_F entre 1,60 y 2,60 mmol m⁻² s⁻¹ MPa⁻¹); muy alta (K_F ≥ 2,60 mmol m⁻² s⁻¹ MPa⁻¹) (Figura 2). Con relación a las accesiones, el 19% conformaron el grupo de conductancia “muy alta”, el 21,4% de “alta”, el 42,8% de “moderada” y el 16,7% de “baja”. Respecto a las progenies de Cenicafé 1, el 25% conformaron el grupo de muy alta, 37,5% el de alta, y 37,5% el de moderada.

Tabla 1. Valores de conductancia hidráulica foliar (K_F; mmol m⁻² s⁻¹ MPa⁻¹) de las 42 accesiones que conforman la colección núcleo de germoplasma de *Coffea* sp. La K_F de cada accesión se calculó mediante el método de flujo evaporativo (Sack & Scoffoni, 2012). Se utilizaron ocho hojas por cada una de las accesiones de acuerdo a la metodología descrita en el texto.

Identificador Accesión	Media	Desv. Estándar	Mediana
CCC35	0,336	0,100	0,347
CCC115	0,557	0,145	0,566
CCC187	0,686	0,109	0,666
CCC403	0,660	0,063	0,673
CCC1087	0,519	0,067	0,501
CCC1146	0,449	0,114	0,430
CCC40	0,505	0,170	0,475
CCC135	1,268	0,170	1,272
CCC165	1,637	0,189	1,628
CCC168	1,453	0,189	1,458

Continúa...

...continuación.

Identificador Accesoión	Media	Desv. Estándar	Mediana
CCC178	1,062	0,167	1,035
CCC183	0,980	0,179	0,906
CCC204	0,989	0,189	1,072
CCC210	1,231	0,204	1,299
CCC293	1,085	0,156	1,063
CCC309	0,959	0,175	0,919
CCC343	1,272	0,143	1,335
CCC354	1,724	0,316	1,709
CCC474	0,932	0,150	0,928
CCC527	1,025	0,236	0,949
CCC534	1,237	0,274	1,197
CCC1056	1,387	0,288	1,301
CCC1087	1,533	0,285	1,565
CCC48	0,854	0,129	0,884
CCC757	1,594	0,124	1,570
CCC1026	2,166	0,259	2,188
CCC156	2,457	0,374	2,558
CCC428	2,019	0,289	2,020
CCC436	2,261	0,282	2,266
CCC496	2,518	0,339	2,589
CCC1059	2,071	0,172	2,024
CCC1102	2,550	0,659	2,541
CCC66	2,250	0,360	2,378
CCC129	2,559	0,265	2,485
CCC1011	4,397	0,845	4,455
CCC1131	5,343	0,307	5,176
CCC50	3,574	0,351	3,648
CCC176	3,151	0,183	3,225
CCC427	4,609	0,399	4,589
CCC1045	4,392	0,708	4,491
CCC16	3,352	0,339	3,387
CCC82	4,668	0,582	4,606

Tabla 2. Valores de conductancia hidráulica foliar (K_F ; $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$) de las ocho progenies que conforman la variedad Cenicafé 1. La K_F de cada progenie se calculó mediante el método de flujo evaporativo (Sack & Scofoni, 2012). Se utilizaron ocho hojas por cada una de las accesiones de acuerdo a la metodología descrita en el texto.

Variedad Cenicafé 1 (Progenies)	Media	Desv. Estándar	Mediana
Cenicafé 1(6)	1,49	0,370	1,65
Cenicafé 1(7)	1,54	0,467	1,47
Cenicafé 1(8)	1,49	0,043	1,49
Cenicafé 1(1)	2,05	0,309	2,06
Cenicafé 1(4)	2,36	0,461	2,37
Cenicafé 1(5)	2,18	0,395	2,24
Cenicafé 1(2)	4,27	0,670	4,21
Cenicafé 1(3)	4,52	0,720	4,19

El análisis de varianza (AOV) para la variable K_F corroboró las diferencias entre los cuatro grupos ($Df= 3$; $F= 1631,96$; $p= < 2,0 \times 10^{-16}$). La comparación entre grupos mostró que aquel con conductancia “4. Muy Alta” logró la mayor K_F con respecto a los demás en términos estadísticos (entre 43% y 87%), en segundo lugar, el grupo con conductancia “3. Alta” fue estadísticamente mayor que el de conductancia “2. Media” y “1. Baja” (47% y 77%, respectivamente). El grupo con conductancia “1. Baja” fue estadísticamente menor que el resto de grupos (entre 57% y 87%) (Figura 3).

Los valores de K_F reportados en esta investigación fueron estadísticamente significativos para demostrar que hubo agrupamiento entre las accesiones de la colección núcleo de germoplasma de café y entre las progenies que conforman la variedad Cenicafé 1. La conductancia hidráulica foliar

mostró una significativa variación, de hasta diez órdenes de magnitud, entre las accesiones que conforman la colección núcleo de germoplasma de *Coffea* sp. Las accesiones CCC16, CCC50, CCC82, CCC176, CCC427, CCC1011, CCC1045 y CCC1131 fueron clasificadas dentro del grupo conductancia foliar muy alta, siendo la accesión CCC1131 (“Catuai”) la única que corresponde a una variedad comercial que es cultivada en el Brasil. Cabe mencionar que dentro de este grupo se identificó una accesión que corresponde a la especie diploide *Coffea canephora*. Las demás son accesiones silvestres y semisilvestres de la especie *C. arabica* recolectadas en la segunda mitad del siglo XX en las expediciones botánicas de la FAO en 1968 (Meyer et al., 1968) y del instituto ORSTOM (ahora IRD; Francia) en 1966 (Guillaumet & Hallé, 1978) y que se encuentran en los bancos de germoplasma de café establecidos en Colombia, Costa Rica y Brasil (Meyer et al., 1968).

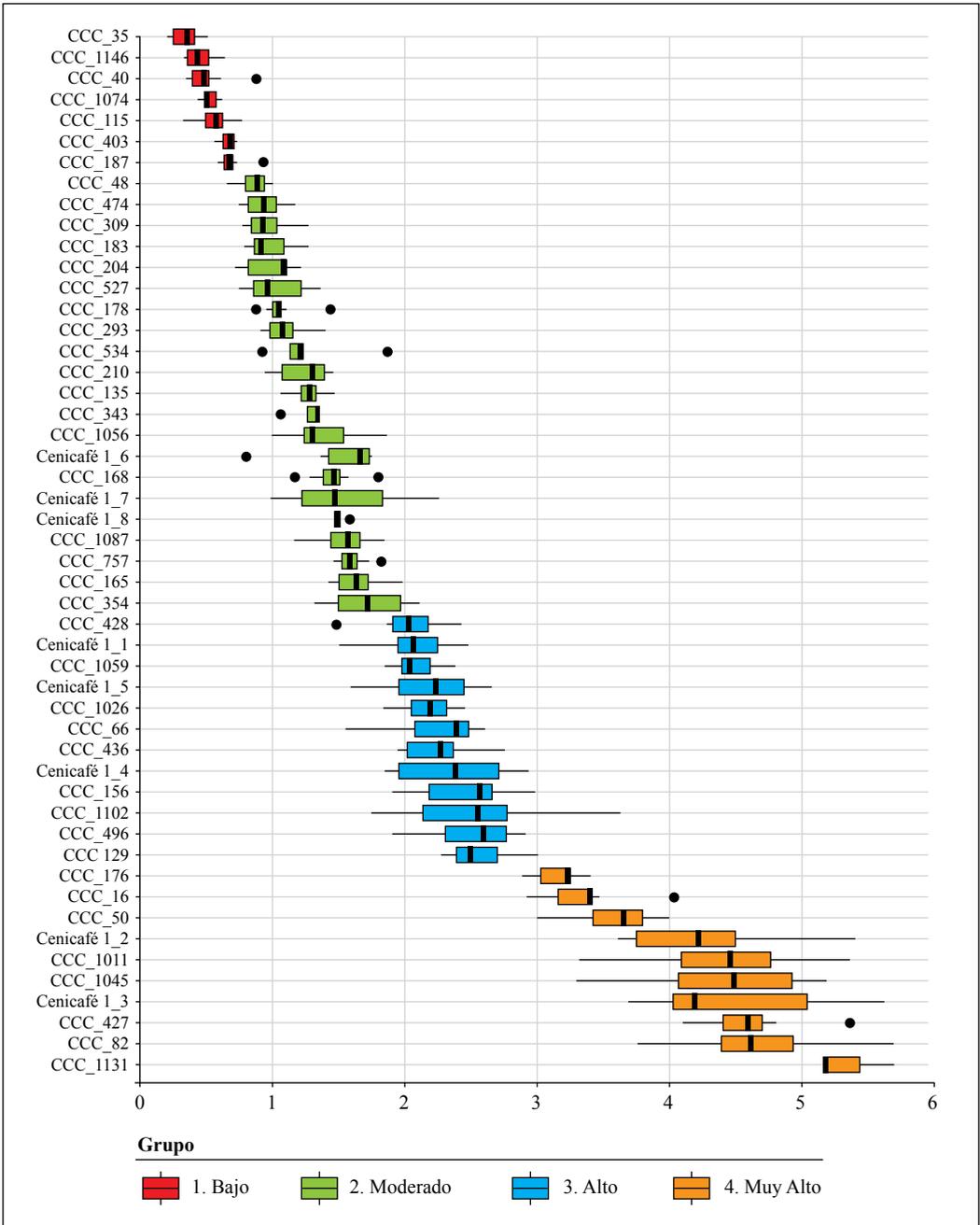


Figura 2. Agrupación de las accesiones y progenies de Cenicafé 1 mediante distribución por cuartil de la variable K_F . Se definieron cuatro grupos que quedaron conformados así: 1. Baja ($K_F \leq 0,96 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$); 2. Moderada (K_F entre 0,96 y 1,60 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$); 3. Alta (K_F entre 1,60 y 2,60 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$); 4. Muy alta ($K_F \geq 2,60 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$).

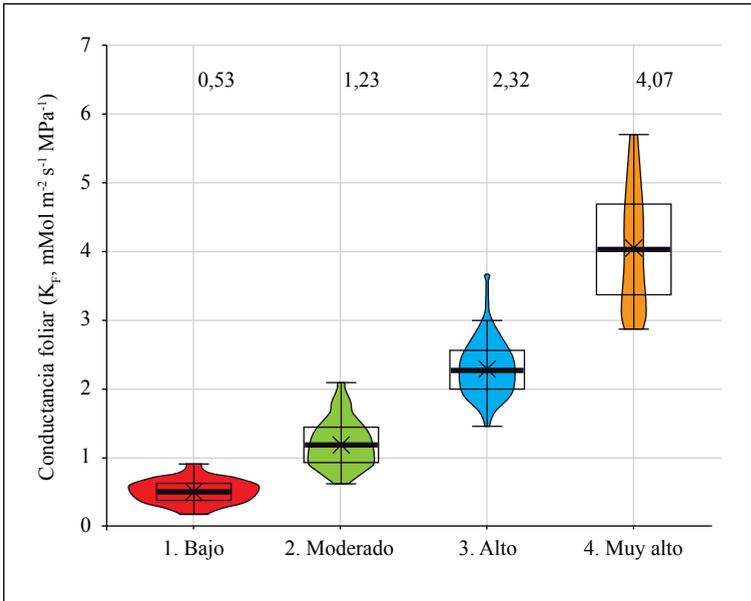


Figura 3. Comparaciones múltiples post hoc entre los grupos de conductancia [1: Bajo ($K_F \leq 0,96 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$); 2: Moderado (K_F entre 0,96 y 1,60 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$); 3: Alto (K_F entre 1,60 y 2,60 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$); 4: Muy alto ($K_F \geq 2,60 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$)] para las accesiones de la colección núcleo de germoplasma de *Coffea* sp., con base en los promedios de la variable K_F (Df= 3; F= 1631,96, $p \leq 2,0 \text{ e}^{-16}$).

Este grupo de accesiones estarían en orden de prioridad para una posterior evaluación de esta variable fisiológica en futuros programas de mejoramiento genético, orientados a mejorar las restricciones hidráulicas de las hojas del café que limitarían su rendimiento fotosintético y potencial producción de biomasa. Sin embargo, ninguna de las progenies de la variedad Cenicafé 1 quedó clasificada dentro del grupo de conductancia hidráulica baja, solamente dos progenies fueron clasificadas con K_F moderada y el resto de las progenies tuvieron una K_F alta o muy alta, lo cual es muy relevante para el desempeño fotosintético de esta variedad.

En plantas de *C. arabica*, variedad “Catuai” Vermelho IAC44, cultivadas al sol y a la sombra, Martins et al. (2014), usando el método de rehidratación cinética, estimaron que las conductancias foliares eran de $6,9 \pm 0,1$ y $10,9 \pm 1,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$, respectivamente, siendo significativamente inferiores a las conductancias estimadas por Brodrribb et al.

(2005) para otras especies de árboles tropicales, las cuales variaron entre 17,0 y 36,0 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$. Gascó et al. (2004), usando el método de flujo por alta presión, ya habían estimado una baja conductancia foliar de *C. arabica* ($4,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$) sin especificar variedad o genotipo. Nardini et al. (2014) en plantas de café encontraron una variabilidad en la conductancia foliar de cuatro genotipos de *C. arabica*: Borbón ($4,9 \pm 1,9$), Maragogipe ($3,3 \pm 0,3$), Híbrido F2 ($3,2 \pm 0,8$) y una accesión silvestre ($4,6 \pm 1,4$), siendo la variedad Borbón la de mayor valor de conductancia, utilizando el método de rehidratación cinética. Recientemente, Mauri et al. (2020) identificaron diferencias intraespecíficas cuando midieron la conductancia foliar de *C. racemosa* ($6,14 \pm 1,76$), *C. canephora* cv Conilon ($6,19 \pm 1,76$), *C. arabica* ($6,76 \pm 1,44$), *C. liberica* ($7,00 \pm 1,32$) y *C. canephora* cv Apoatá ($7,67 \pm 2,26$), usando el método de rehidratación cinética.

Wang et al. (2022) han encontrado que los valores de K_F entre especies y aún entre

individuos de la misma especie pueden ser incomparables porque el método de medición escogido y las condiciones experimentales pueden incidir en su cálculo. Recientemente el método del flujo evaporativo es el más usado para medir la K_F porque, a diferencia de otros métodos, mimetiza la transpiración natural de la hoja permitiendo determinar con exactitud el flujo hídrico a través de la lámina foliar. Además, es el método que permite calcular más rápidamente (30 min) la conductancia hidráulica foliar (Lovisolo & Tramontini, 2010; Sack & Scoffoni, 2012). Martins et al. (2019) estimaron una conductancia foliar en promedio de $2,6 \pm 0,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ para plantas de *C. arabica* de las variedades Catuaí y Catimor, siendo el primer reporte para *Coffea* sp. en utilizar el método de flujo evaporativo.

Wang et al. (2022) concluyeron que la variabilidad de los valores de K_F , encontrada en los diferentes estudios, podrían ser atribuidos a artefactos metodológicos por lo que, con el propósito de compararlos, era importante especificar las condiciones experimentales utilizadas en la medición de la conductancia hidráulica foliar. En el método de flujo evaporativo, el cálculo del potencial de agua y del flujo hídrico foliar son afectados por el muestreo, el almacenamiento previo de las hojas, el tipo de agua usada en la transpiración, la temperatura, la humedad relativa y el tipo de luz incidente sobre la hoja. Estos factores fueron tenidos en cuenta en la determinación de la K_F en las 42 accesiones de *Coffea* sp. así como en las ocho progenies de la variedad Cenicafe 1. Adicionalmente, se minimizaron los posibles episodios de cavitación mediante el manejo agronómico de las plantas que incluyó fertilización edáfica, aplicación de enmiendas, de acuerdo al análisis del suelo, y condiciones agroclimáticas que garantizaron la

suficiente irrigación de las parcelas sembradas a plena exposición solar.

En varias especies vegetales con linajes filogenéticamente definidos, el transporte de agua en las hojas y el intercambio de gases mostraron una diversificación evolutiva fuertemente acoplada, impulsada por cambios en la arquitectura de la venación foliar y modulada por el clima (Sack et al., 2016). Esta validación confirma que los rasgos hidráulicos de las hojas tales como, conductancia hidráulica foliar, conductancia estomática o densidad de venación deben ser considerados explícitamente como variables subyacentes en determinar las diferencias en la tasa fotosintética, y como objetivos para mejorar la productividad de las plantas (Sack et al., 2012; Sack et al., 2016; Scoffoni et al., 2016).

Puede concluirse que el método del flujo evaporativo para calcular la conductancia hidráulica foliar en café es un método rápido, reproducible y que no depende de condiciones ambientales específicas.

La conductancia hidráulica foliar de las 42 accesiones que conforman la colección núcleo de germoplasma del café mostraron una amplia variabilidad fenotípica.

Las accesiones CCC16, CCC50, CCC82, CCC176, CCC427, CCC1011, CCC1045 y CCC1131 fueron clasificadas dentro del grupo conductancia foliar muy alta y estarían en orden de prioridad para una posterior evaluación de su rendimiento fotosintético, tasa de crecimiento y productividad.

Ninguna de las progenies de la Variedad Cenicafe 1 quedó clasificada dentro del grupo de conductancia hidráulica baja.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los auxiliares de la disciplina de Fisiología Vegetal: Marcela Mora, Claudia Valencia, Bibiana Escobar y Mario Franco. Esta investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Crossref Funder ID 100019597), proyecto número FIS10813 y la estancia postdoctoral de Cristan Camilo fue financiada por el Ministerio de Ciencias y Tecnología (Contrato N° 80740-044-2021).

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Conceptualización: **RA**; Curación de datos: **RA y CU**; Análisis formal: **RA y CU**; Adquisición de fondos: **RA**; Investigación: **RA, CC, NF**; Metodología: **RA, CC y NF**; Software: **CC y CU**; Redacción–borrador original: **RA, CC, CU y NF**; Redacción–revisión y edición: **RA, CC, CU y NF**. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Brodribb, T. J., Holbrook, N. M., Zwieniecki, M. A., & Palma, B. (2005). Leaf hydraulic capacity in ferns, conifers and angiosperms: Impacts on photosynthetic maxima. *New Phytologist*, *165*(3), 839–846. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01259.x>
- Brodribb, T. J., Feild, T. S., & Jordan, G. J. (2007). Leaf Maximum Photosynthetic Rate and Venation Are Linked by Hydraulics. *Plant Physiology*, *144*(4), 1890–1898. <https://doi.org/10.1104/pp.107.101352>
- Brodribb, T. J., & Buckley, T. N. (2018). Leaf Water Transport: A Core System in the Evolution and Physiology of Photosynthesis. En W. W. Adams III & I. Terashima (Eds.), *The Leaf: A Platform for Performing Photosynthesis* (pp. 81–96). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93594-2_4
- Ceulemans, R., & Saugier, B. (1991). Photosynthesis. En A. S. Raghavendra (Ed.), *Physiology of trees* (pp. 21–50). Wiley.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2017). Informe Anual Cenicafé 2017. <https://doi.org/10.38141/10783/2017>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2018). Informe Anual Cenicafé 2018. <https://doi.org/10.38141/10783/2018>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2019). Informe Anual Cenicafé 2019. <https://doi.org/10.38141/10783/2019>
- Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2020). Informe Anual Cenicafé 2020. <https://doi.org/10.38141/10783/2020>
- Meyer, F. G., Fernie, L. M., Narasimhaswamy, R. L., Monaco, L. C., & Greethead, D. J. (1968). *FAO Coffee Mission to Ethiopia 1964-1965*. FAO.
- Franck, N., Vaast, P., Genard, M., & Dauzat, J. (2006). Soluble sugars mediate sink feedback down-regulation of leaf photosynthesis in field-grown *Coffea arabica*. *Tree Physiology*, *26*(4), 517–525. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.4.517>
- Gascó, A., Nardini, A., & Salleo, S. (2004). Resistance to water flow through leaves of *Coffea arabica* is dominated by extra-vascular tissues. *Functional Plant Biology*, *31*(12), 1161. <https://doi.org/10.1071/FP04032>
- Guillaumet, J. L., & Hallé, F. (1978). Echantillonnage du matériel *Coffea arabica* récolté en Ethiopie. En A. Charrier (Ed.), *Etude de la structure et de la variabilité génétique des caféiers: Résultats des études et des expérimentations réalisées au Cameroun, en Cote d'Ivoire et à Madagascar sur l'espèce Coffea arabica L. collectée en Ethiopie par une mission ORSTOM en 1966- Bulletin IFCC 14* (pp. 13–18). IFCC.
- Kumar, D., & Tieszen, L. L. (1980). Photosynthesis in *Coffea arabica*. I. Effects of Light and Temperature. *Experimental Agriculture*, *16*(1), 13–19. <https://doi.org/10.1017/S0014479700010656>
- Lovisolo, C., & Tramontini, S. (2010). Methods for Assessment of Hydraulic Conductance and Embolism

- Extent in Grapevine Organs. En S. Delrot, H. Medrano, E. Or, L. Bavaresco, & S. Grando (Eds.), *Methodologies and Results in Grapevine Research* (pp. 71–85). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9283-0_6
- Machado, J. A., Rodrigues, W. P., Baroni, D. F., Pireda, S., Campbell, G., de Souza, G. A. R., Verdin Filho, A. C., Arantes, S. D., de Oliveira Arantes, L., da Cunha, M., Gambetta, G. A., Rakocevic, M., Ramalho, J. C., & Camprotrini, E. (2021). Linking root and stem hydraulic traits to leaf physiological parameters in *Coffea canephora* clones with contrasting drought tolerance. *Journal of Plant Physiology*, 258–259, 153355. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153355>
- Martins, S. C. V., Galmés, J., Cavatte, P. C., Pereira, L. F., Ventrella, M. C., & DaMatta, F. M. (2014). Understanding the Low Photosynthetic Rates of Sun and Shade Coffee Leaves: Bridging the Gap on the Relative Roles of Hydraulic, Diffusive and Biochemical Constraints to Photosynthesis. *PLOS ONE*, 9(4), e95571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095571>
- Martins, S. C. V., Sanglard, M. L., Morais, L. E., Menezes-Silva, P. E., Mauri, R., Avila, R. T., Vital, C. E., Cardoso, A. A., & DaMatta, F. M. (2019). How do coffee trees deal with severe natural droughts? An analysis of hydraulic, diffusive and biochemical components at the leaf level. *Trees*, 33(6), 1679–1693. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01889-4>
- Mauri, R., Cardoso, A. A., da Silva, M. M., Oliveira, L. A., Avila, R. T., Martins, S. C. V., & DaMatta, F. M. (2020). Leaf hydraulic properties are decoupled from leaf area across coffee species. *Trees*, 34(6), 1507–1514. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01983-y>
- Mosquera, L.P., Riaño, N. M., Arcila, J., & Ponce, C. A. (1999). Fotosíntesis, respiración y fotorrespiración en hojas de café *Coffea sp.* *Revista Cenicafé*, 50(3), 215–221.
- Nardini, A., Öunapuu-Pikas, E., Savi, T., Nardini, A., Öunapuu-Pikas, E., & Savi, T. (2014). When smaller is better: Leaf hydraulic conductance and drought vulnerability correlate to leaf size and venation density across four *Coffea arabica* genotypes. *Functional Plant Biology*, 41(9), 972–982. <https://doi.org/10.1071/FP13302>
- R Software Team. (2019). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing (3.6.1.) [Computer software]. <https://www.r-project.org>
- Sack, L., & Scoffoni, C. (2012). Measurement of Leaf Hydraulic Conductance and Stomatal Conductance and Their Responses to Irradiance and Dehydration Using the Evaporative Flux Method (EFM). *Journal of Visualized Experiments*, 70, 4179. <https://doi.org/10.3791/4179>
- Sack, L., Ball, M. C., Brodersen, C., Davis, S. D., Des Marais, D. L., Donovan, L. A., Givnish, T. J., Hacke, U. G., Huxman, T., Jansen, S., Jacobsen, A. L., Johnson, D. M., Koch, G. W., Maurel, C., McCulloh, K. A., McDowell, N. G., McElrone, A., Meinzer, F. C., Melcher, P. J., ... Holbrook, N. M. (2016). Plant hydraulics as a central hub integrating plant and ecosystem function: Meeting report for ‘Emerging Frontiers in Plant Hydraulics’ (Washington, DC, May 2015). *Plant, Cell & Environment*, 39(9), 2085–2094. <https://doi.org/10.1111/pce.12732>
- Scoffoni, C., Chatelet, D. S., Pasquet-kok, J., Rawls, M., Donoghue, M. J., Edwards, E. J., & Sack, L. (2016). Hydraulic basis for the evolution of photosynthetic productivity. *Nature Plants*, 2(6), 1–8. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.72>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Silva, E. A., DaMatta, F. M., Ducatti, C., Regazzi, A. J., & Barros, R. S. (2004). Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees. *Field Crops Research*, 89(2), 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.02.010>
- Tatagiba, S. D., Pezzopane, J. E. M., Reis, E. F. (2010). Crescimento vegetativo de mudas de café arábica (*Coffea arabica* L.) submetidas a diferentes níveis de sombreamento. *Coffee Science*, 5(3), 251–261. <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/5413>
- Wang, X., Zhao, J., Huang, J., Peng, S., & Xiong, D. (2022). Evaporative flux method of leaf hydraulic conductance estimation: Sources of uncertainty and reporting format recommendation. *Plant Methods*, 18(1), 63. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00888-w>
- Wu, T., Tissue, D. T., Li, X., Liu, S., Chu, G., Zhou, G., Li, Y., Zheng, M., Meng, Z., & Liu, J. (2020). Long-term effects of 7-year warming experiment in the field on leaf hydraulic and economic traits of subtropical tree species. *Global Change Biology*, 26(12), 7144–7157. <https://doi.org/10.1111/gcb.15355>
- Xiong, D., & Nadal, M. (2020). Linking water relations and hydraulics with photosynthesis. *The Plant Journal*, 101(4), 800–815. <https://doi.org/10.1111/tpj.14595>
- Zapata, P. C., Andrade, H. J., & Nieto Abril, Z. K. (2017). Comportamiento ecofisiológico del cafeto (*Coffea arabica* L.) cv. Castillo en sistemas agroforestales de Tibacuy, Cundinamarca. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(1), 61–70. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n1.2017.63>