

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
MENCIÓN: SANIDAD VEGETAL**



**CARACTERIZACIÓN FENOTÍPICA Y SELECCIÓN DE 169 ACCESIONES DE
Coffea arabica L. BASADO EN LA RESISTENCIA A *Hemileia vastatrix* (Berk. & Br.) EN
CONDICIONES DE INFECCIÓN NATURAL Y ARTIFICIAL EN LA EEA DE
PICHANAKI – INIA**

Tesis

Para optar el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS,
MENCIÓN: SANIDAD VEGETAL**

PRESENTADO POR:

RICHARD PAREDES ESPINOSA

ASESOR:

JOSÉ LUIS GIL BACILIO

Tingo María – Perú.

2023



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Nro.001-2023-UP-FA-UNAS

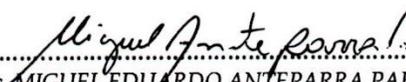
En la ciudad universitaria, siendo las 11:00 a.m., del miércoles 22 de marzo de 2023, reunidos en la sala de audiovisuales de la Escuela de Posgrado, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

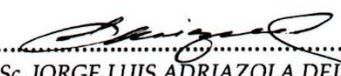
“CARACTERIZACIÓN FENOTÍPICA Y SELECCIÓN DE 169 ACCESIONES DE *Coffea arabica* L. BASADO EN LA RESISTENCIA A *Hemileia vastatrix* (Berk. & Br.) EN CONDICIONES DE INFECCIÓN NATURAL Y ARTIFICIAL EN LA EEA DE PICHANAKI - INIA”

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias Agrícolas, mención Sanidad Vegetal, Ing. **RICHARD PAREDES ESPINOSA**

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO**.

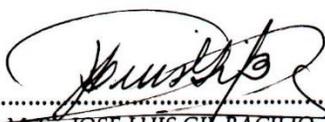
Acto seguido, a horas 1:20 p.m. el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.


.....
M. Sc. **MIGUEL EDUARDO ANTEPARRA PAREDES**
Presidente del Jurado


.....
M. Sc. **JORGE LUIS ADRIAZOLA DEL AGUILA**
Miembro del Jurado


.....
M. Sc. **FAUSTO SILVA CARDENAS**
Miembro del Jurado




.....
M. Sc. **JOSE LUIS GIL BACILIO**
Asesor



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 269- 2023 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Escuela de Posgrado UNAS

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de investigación

| TÍTULO | AUTOR | PORCENTAJE DE SIMILITUD |
|--|--------------------------|----------------------------------|
| Caracterización fenotípica y selección de 169 accesiones de Coffea arabica L. basado en la resistencia a Hemileia vastatrix (Berk. & Br.) en condiciones de infección natural y artificial en la EEA de Pichanaki - INIA | RICHARD PAREDES ESPINOSA | 23 % Veintitrés |

Tingo María, 09 de octubre de 2023



Dr. Tomás Menacho Mallqui
DIRECTOR

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO**

**REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL
GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO**

| | |
|-------------------------------|--|
| Universidad | : Universidad Nacional Agraria de la Selva |
| Facultad | : Facultad de Agronomía |
| Título de Tesis | : Caracterización fenotípica y selección de 169 accesiones de <i>Coffea arabica</i> L. basado en la resistencia a <i>Hemileia vastatrix</i> (Berk. & Br.) en condiciones de infección natural y artificial en la EEA de Pichanaki - INIA |
| Autor | : Richard Paredes Espinosa |
| DNI | : 44020308 |
| Correo electrónico | : richard.paredes@unas.edu.pe |
| Asesor | : M.Sc. José Luis Gil Bacilio |
| Maestría y mención | : Maestría en Ciencias Agrícolas/Sanidad Vegetal |
| Programa de Investigación | : Diagnóstico fitosanitario y bioinsumos |
| Línea (s) de Investigación | : Diagnóstico y evaluación de fitopatógenos, insectos plaga y arvenses en especies agrícolas y forestales de investigación. |
| Eje temático de investigación | : Caracterización fenotípica y selección de accesiones de café. |
| Lugar de Ejecución | : Distrito de Pichanaki |
| Duración del trabajo | : Enero 2020 – diciembre 2021 |
| Fecha de Inicio | : Enero 2020 |
| Término | : Diciembre 2021 |
| Financiamiento | : S/. 15600.00 |
| FEDU | : NO |
| Propio | : SI |
| Otros | : SI |

Tingo María – Perú – Octubre, 2023

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
MENCIÓN: SANIDAD VEGETAL**



**CARACTERIZACIÓN FENOTÍPICA Y SELECCIÓN DE 169 ACCESIONES DE
Coffea arabica L. BASADO EN LA RESISTENCIA A *Hemileia vastatrix* (Berk. & Br.) EN
CONDICIONES DE INFECCIÓN NATURAL Y ARTIFICIAL EN LA EEA DE
PICHANAKI – INIA**

| | |
|-----------------------------------|---|
| Autor | : Richard Paredes Espinosa |
| Asesor (es) | : Mg. Sc. José Luis Gil Bacilio : Ing. Oscar E. Cabezas Huayllas : Ph. D. Pedro Javier Mansilla Córdova : Ph. D. Juan Carlos Guerrero Abad |
| Programa de Investigación | : Diagnóstico fitosanitario y bioinsumos |
| Línea (s) de Investigación | : Diagnóstico y evaluación de fitopatógenos, insectos plaga y arvenses en especies agrícolas y forestales de investigación. |
| Eje temático | : Caracterización fenotípica y selección de accesiones de café. |
| Lugar de ejecución | : Pichanaki, Chanchamayo, Junín |
| Duración del trabajo | : Enero del 2020 a diciembre del 2021 |
| Financiamiento | : S/. 15 600,00 |

Tingo María – Perú. 2023

DEDICATORIA

A mi compañera de vida y eterna fuente de apoyo, Susan Sandra Silva Matto, cuyo amor incondicional ha hecho posible la creación de esta obra científica.

A mi querida Anjali Jandi Paredes Silva, la luz de mis ojos y mi fuente inagotable de amor, cuyas palabras de aliento, porras y vivas han sido mi inspiración inquebrantable para completar esta obra.

A mis queridos padres, Ana María Espinosa y Ángel Paredes, cuyo amor incondicional y firme disciplina me guiaron en el camino hacia la consecución de mis metas y objetivos académicos.

AGRADECIMIENTO

- A mi Alma Mater, Universidad Nacional Agraria de la Selva y en especial a la Escuela de Posgrado por contribuir en mi formación.
- Al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), en especial a la Dirección de Recursos Genéticos y Biotecnología (DRGB) y a la EEA Pichanaki por brindar acceso a los recursos vegetales e instalaciones para el desarrollo del estudio de investigación.
- Al M.Sc. Blgo. José Luis Gil Bacilio, asesor de la presente tesis que a través de su apoyo técnico y científico permitió la culminación del presente estudio de investigación.
- Al Ing. Oscar E. Cabezas Huayllas, por su aporte con sus conocimientos científicos y plena colaboración en la redacción del documento final.
- Al Ph. D. Pedro Javier Mansilla Córdova, Ph. D. Juan Carlos Guerrero Abad, Ph. D. Dina Lidia Gutiérrez Reynoso y al Dr. Carlos Alberto Amasifuén Guerra, por brindarme el asesoramiento en el desarrollo de la investigación.
- Al M.Sc. Miguel Anteparra Paredes, presidente del jurado de tesis por su valiosa colaboración en la revisión y comentarios finales.
- A los miembros del jurado de tesis: Ing. M. Sc. Jorge Adriazola del Águila e Ing. M. Sc. Fausto Silva Cárdenas por sus sugerencias y soportes en la redacción de la tesis.
- Al Proyecto Concytec – Banco Mundial “Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica” 8682-PE, a través de su unidad ejecutora ProCiencia [contrato N° 031-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV], con el cual se ejecutó el subproyecto "Implementación de técnicas de diagnóstico de enfermedades en Pitahaya (*Hylocereus spp.*), Tara (*Caesalpinia spinosa* (Mol.) Kuntze) y Azucena (*Lilium spp.*) como parte de la creación de la Clínica Fitopatológica en la región Amazonas”, también conocido como “Clínica Fitopatológica” y que hizo posible el financiamiento de la tesis, así como el incentivo recibido durante 13 meses.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|------|
| RESUMEN | |
| ABSTRACT | |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1. Café (<i>Coffea arabica</i>) | 3 |
| 2.1.1. Origen y clasificación taxonómica | 3 |
| 2.1.2. Diversidad de cultivares del <i>C. arabica</i> | 3 |
| 2.1.3. Banco de germoplasma de <i>Coffea</i> | 5 |
| 2.2. Biología, epidemiología y diversidad genética de <i>H. vastatrix</i> | 6 |
| 2.2.1. Taxonomía y biología | 6 |
| 2.2.2. Proceso de infección y ciclo de vida..... | 7 |
| 2.2.3. Epidemiología..... | 9 |
| 2.2.4. Variabilidad genética de <i>H. vastatrix</i> | 13 |
| 2.3. Resistencia a la roya del café..... | 13 |
| 2.3.1. Resistencia genética..... | 14 |
| 2.3.2. Resistencia de campo..... | 16 |
| 2.3.3. Tolerancia | 17 |
| 2.3.4. Métodos de inoculación | 17 |
| 2.4. Antecedentes de la caracterización utilizando variables agromorfológicas para genotipos de <i>C. arabica</i> | 18 |
| 2.5. Antecedentes de la caracterización y/o evaluación de la resistencia de genotipos de <i>C. arabica</i> a la roya con inoculación natural..... | 19 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 21 |
| 3.1. Ubicación y características del campo experimental..... | 21 |
| 3.2. Diseño experimental y manejo de campo..... | 21 |
| 3.3. Material vegetal | 22 |
| 3.4. Datos colectados | 22 |
| 3.4.1. Variables evaluadas | 22 |
| 3.4.2. Medición de variables..... | 23 |
| 3.5. Evaluación de la resistencia incompleta en campo..... | 27 |
| 3.6. Evaluación de la resistencia incompleta en laboratorio..... | 27 |

| | |
|--|----|
| 3.6.1. Material vegetal | 27 |
| 3.6.2. Colecta de uredosporas | 28 |
| 3.6.3. Multiplicación de uredosporas..... | 28 |
| 3.6.4. Prueba de germinación..... | 29 |
| 3.6.5. Colecta y preparación de las hojas..... | 29 |
| 3.6.6. Inoculación y evaluación de los componentes de la resistencia | 30 |
| 3.7. Análisis estadístico | 31 |
| 3.7.1. Caracterización agromorfológica y diversidad fenotípica | 31 |
| 3.7.2. Determinación de genotipos resistencia en campo | 33 |
| 3.7.3. Análisis de los componentes de la resistencia | 34 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 35 |
| 4.1. Análisis de varianza..... | 35 |
| 4.2. Estadística descriptiva y parámetros genéticos..... | 36 |
| 4.2.1. Estadística descriptiva..... | 36 |
| 4.2.2. Parámetros genéticos | 39 |
| 4.3. Coeficiente de correlación entre las variables agromorfológicas..... | 40 |
| 4.4. Análisis de la diversidad fenotípica..... | 43 |
| 4.4.1. Análisis de agrupamiento..... | 43 |
| 4.4.2. Análisis de componentes principales (ACP) | 48 |
| 4.5. Determinación de genotipos resistentes en campo | 53 |
| 4.6. Análisis de los componentes de la resistencia | 56 |
| V. CONCLUSIONES | 61 |
| VI. PROPUESTAS A FUTURO..... | 62 |
| VII. REFERENCIAS..... | 63 |
| ANEXO | 85 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Pág. |
|---|------|
| 1. Departamento y número de accesiones colectadas en el Perú y conservadas en la Colección de germoplasma de <i>C. arabica</i> del INIA. | 22 |
| 2. Descriptores utilizados para el estudio de la caracterización agromorfológica de la Colección de germoplasma de <i>C. arabica</i> del INIA. | 23 |
| 3. Accesiones y cultivares de <i>C. arabica</i> utilizados en las pruebas de inoculaciones artificiales en laboratorio. | 28 |
| 4. Índice de esporulación para la caracterización de la resistencia de accesiones de <i>C. arabica</i> frente a <i>H. vastatrix</i> | 31 |
| 5. Resumen del ANOVA, considerando los resultados de los cuadrados medios obtenidos para 20 variables agromorfológicas evaluadas en 162 accesiones de <i>C. arabica</i> de la colección de germoplasma del INIA, Pichanaki. | 35 |
| 6. Parámetros descriptivos y de variación genética para 20 características agromorfológicas evaluadas en 162 accesiones de café de la colección de germoplasma del INIA, Pichanaki. | 37 |
| 7. Agrupación de 162 accesiones de <i>C. arabica</i> de la colección de germoplasma del INIA, obtenida mediante el método de Tocher con base en la distancia de Mahalanobis (D^2) utilizando 19 rasgos agromorfológicos. | 44 |
| 8. Eigen-vectores de los primeros cinco componentes principales (CP) para 19 variables agromorfológicas utilizados para clasificar a 162 accesiones de <i>C. arabica</i> de la colección de germoplasma del INIA. | 49 |
| 9. Mínimo (Mín.), máximo (Máx.), promedio (Prom.) y desviación estándar (DE) del índice de la enfermedad (IE) y área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE) para 168 accesiones de <i>C. arabica</i> de la colección de germoplasma del INIA, calculados para los ciclos epidemiológicos 2019-2020 y 2020-2021..... | 55 |
| 10. Resumen del análisis de varianza (ANOVA) para los cuadrados medios de las variables que conforman los componentes de la resistencia evaluadas en accesiones de colección de germoplasma de <i>C. arabica</i> del INIA y cultivares. | 56 |
| 11. Promedios obtenidos de la evaluación de siete componentes de la resistencia horizontal para las accesiones de la colección de germoplasma de <i>C. arabica</i> del INIA y cultivares comerciales. | 58 |

| | | |
|-----|---|----|
| 12. | Registros climáticos de la colección de germoplasma de <i>C. arabica</i> del INIA durante el estudio, temperatura (T°) (mínima, máxima y promedio), humedad relativa (HR) y precipitación (mm)..... | 86 |
| 13. | Número promedio de lesiones generadas por la inoculación artificial con de <i>H. vastatrix</i> en accesiones y cultivares de <i>C. arabica</i> , según el grado de severidad (Sev) evaluadas en el laboratorio de Fitopatología de la EEA Pichanaki, INIA. | 87 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Pág. |
|---|------|
| 1. Vista microscópica de <i>H. vastatrix</i> . (A) Sori uredospórico formado alrededor de la estoma de la hoja. (B) Características de la uredosporas depositado en la superficie del envés de la hoja..... | 7 |
| 2. Ciclo de vida de <i>H. vastatrix</i> e hipótesis de la ocurrencia de la fase aecia en algún hospedante desconocido..... | 12 |
| 3. Matriz de correlación de Pearson para 20 variables agromorfológicas evaluadas en la colección de germoplasma del INIA. Coeficiente de correlación fenotípica (diagonal superior). Coeficiente de variación genotípica (diagonal inferior). Significancia al 5 % (*). Significancia al 1 % (**)..... | 42 |
| 4. Valores medios de 19 características agromorfológica evaluadas para 10 grupos obtenidos por el agrupamiento de 162 accesiones de <i>C. arabica</i> de la colección de germoplasma del INIA, a partir del método Tocher usando la distancia de Malanohobis (D^2)..... | 46 |
| 5. Gráficos de dispersión de 162 accesiones de <i>C. arabica</i> de la colección de germoplasma del INIA, en relación con los primeros 5 componentes principales (CP) obtenidos a partir de 19 caracteres agromorfológicos. | 51 |
| 6. Dendograma de accesiones y cultivares de <i>C. arabica</i> agrupados en base a sus niveles de resistencia a <i>H. vastatrix</i> . Moderadamente resistente (MR), susceptible (S), control (C), resistentes (R)..... | 59 |
| 7. Colecta de uredosporas <i>H. vastatrix</i> en hojas de café. (A) Selección de hojas lesionada sin daño mecánico o por patógenos. (B) Tipo de hojas colectadas. | 88 |
| 8. Multiplicación de uredosporas de <i>H. vastatrix</i> . (A) Raspada y depósito de inóculo en vaso con 100 mL de agua destilada. (B) Aplicación de la suspensión en la superficie inferior de las hojas de café var. Caturra. (C) Simulación de cámara húmeda en plantas inoculadas. (D y E) Hojas con lesiones cloróticas cubiertas de uredosporas 60 días después de la inoculación..... | 89 |
| 9. Accesiones de <i>C. arabica</i> resistentes y susceptibles a <i>H. vastarix</i> correspondientes a la Colección de germoplasma del INIA..... | 90 |
| 10. Selección del modelo y número de componentes para el agrupamiento mediante el criterio de información Bayesiana (BIC), usando n el paquete “Mclust” en el software estadístico R..... | 91 |
| 11. Método de agrupamiento usando la variable índice de la enfermedad (IE) y área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE) para los ciclos epidemiológicos 2019-2020 | |

y 2020-2021, evaluados en 168 accesiones de *C. arabica* de la colección de germoplasma del INIA. 92

RESUMEN

La producción de café (*Coffea arabica*) es de gran importancia económica para el Perú. El estudio de su caracterización agromorfológica y estimación de parámetros genéticos puede proporcionar información valiosa para la selección y mejora genética del cultivo. Por lo tanto, el objetivo principal fue estudiar la variabilidad genética de las accesiones de café mediante la caracterización agromorfológica con énfasis en la resistencia a *H. vastatrix*. El análisis de parámetros genéticos y el enfoque multivariado revelaron una gran variación fenotípica y alta heredabilidad en los caracteres relacionados con el rendimiento y la resistencia a la roya amarilla. Mediante el método de Tocher y la distancia de Mahalanobis, se formaron 10 grupos divergentes, siendo los grupos 1, 5, 9 y 10 considerados promisorios para el mejoramiento genético debido a sus características comerciales. El análisis de componentes principales (ACP) demostró que cinco de los componentes explican el 70 % de la variación total, lo que sugiere una oportunidad significativa para el mejoramiento genético mediante la selección y generación de híbridos. Asimismo, el análisis de agrupamiento mediante la distancia Euclidiana estandarizada media y la técnica de Ward identificaron 30, 38 y 100 accesiones con acciones resistentes, tolerantes y susceptibles a la roya amarilla. Finalmente, a través de inoculaciones artificiales con suspensión de uredosporas de *H. vastatrix* y el estudio de los componentes de la resistencia, se determinó que 16 accesiones presentan resistencia cuantitativa a la enfermedad. Estos genotipos se caracterizaron por no desarrollar uredosporas en las lesiones, determinándolos en candidatos prometedores para la generación de nuevas variedades con resistencia duradera a la roya amarilla.

ABSTRACT

Coffee (*Coffea arabica*) production is of great economic importance for Peru. The study of its agro-morphological characterization and estimation of genetic parameters can provide valuable information for crop selection and improvement. Therefore, the main objective was to study the genetic variability of coffee accessions through agro-morphological characterization with an emphasis on resistance to *H. vastatrix*. The analysis of genetic parameters and the multivariate approach revealed significant phenotypic variation and high heritability in traits related to yield and resistance to yellow rust. Using the Tocher method and Mahalanobis distance, 10 divergent groups were formed, with groups 1, 5, 9, and 10 considered promising for genetic improvement due to their commercial characteristics. Principal Component Analysis (PCA) demonstrated that five components explain 70 % of the total variation, indicating a significant opportunity for genetic improvement through selection and hybrid generation. Additionally, the clustering analysis using the mean standardized Euclidean distance and Ward's technique identified 30, 38, and 100 accessions with resistant, tolerant, and susceptible actions against yellow rust. Finally, through artificial inoculations with *H. vastatrix* uredospore suspension and the study of resistance components, 16 accessions were determined to have quantitative resistance to the disease. These genotypes were characterized by not developing uredospores in the lesions, making them promising candidates for generating new varieties with durable resistance to yellow rust.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú el café es el principal producto agrícola de exportación y tiene un gran impacto en la economía familiar rural. En el año 2020, el país produjo más de 227 640 toneladas de café y actualmente, ocupa el octavo lugar en el ranking de países exportadores (ICO, 2021a, 2021b). La planta de café pertenece a la familia Rubiaceae y al género *Coffea* que presenta un gran número de especies; entre las más comercializadas en el mundo son *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (Farah y Ferreira dos Santos, 2015). En el Perú predominan los cultivares arábigos, principalmente las variedades Typica, Caturra, Catimor, Pache y Bourbón (INIA, 2019).

La caracterización de su diversidad es importante porque puede proporcionar información valiosa y útil para la gestión y uso de los recursos genéticos para la mejora del cultivo. Según Atinafu y Mohammed (2017b), la recopilación de datos agromorfológicos podría proporcionar información suficiente para la caracterización eficiente de la variabilidad del café; conocimiento que podría conducir a una mejor explotación del germoplasma mediante la selección apropiada de progenitores que contengan caracteres de interés económico como estabilidad productiva, resistencia a plagas y enfermedades, granos de mayor tamaño y calidad organoléptica, o identificando genotipos de porte bajo con tolerancia a estrés de climas y suelos desafiantes (Giles et al., 2018; A. L. Teixeira et al., 2013). Por lo tanto, el principal objetivo del mejoramiento de plantas es un programa de hibridaciones seguido de la selección de la descendencia (Giles et al., 2018; Sanwal et al., 2015).

Para el éxito del programa de mejoramiento se debe de disponer de una serie de informaciones básicas en cuanto a la estructura genética de la especie, la magnitud de la variabilidad presente en la población y la heredabilidad en sentido amplio para los diferentes caracteres morfológicos de un conjunto de genotipos que serán mejorados (Alemayehu, 2019; F. L. Silva et al., 2015; Ferrão et al., 2008). En este sentido, estimar los coeficientes de variación fenotípica, genotípica y ambiental, son útiles para cuantificar la riqueza existente dentro de una colección de germoplasma (Cheserek et al., 2020; Weldemichael et al., 2017). Sin embargo, el uso de la heredabilidad provee al mejorador de una mejor información sobre la estabilidad fenotípica del individuo, ya que, se basa en la información de un carácter que puede ser transmitible de una generación a otra (Alemayehu, 2019; Paw et al., 2020); es decir, el mejorador puede seleccionar una o varias accesiones basadas en su comportamiento fenotípico (Weldemichael et al., 2017). Por otro lado, el coeficiente de correlación permite direccionar las

estrategias del mejoramiento en función de los efectos de asociación entre dos o más caracteres (Atinafu et al., 2017; Kifle et al., 2018).

Asimismo, muchos fitomejoradores han usado las técnicas del análisis multivariado para estudiar la divergencia genética, a través de la información de la caracterización agromorfológica de las colecciones de germoplasmas, a fin de definir las principales estrategias de mejoramiento para la obtención de mayores ganancias genéticas, pero manteniendo una base genética adecuada en la población (Aghaee et al., 2010b; F. L. Silva et al., 2015; Ferrão et al., 2008; Ivoglo et al., 2008). El análisis multivariado mediante algunos métodos clásicos permite calcular la disimilaridad entre los genotipos, el análisis de conglomerados (AC) y el análisis de componentes principales (ACP) es frecuentemente usado para clasificar y agrupar a diferentes genotipos mediante su valor medio de sus características morfológicas, además, permite predecir y explicar datos complejos, reduciendo la dimensionalidad del uso de múltiples variables dependientes que generalmente se encuentran correlacionadas (Cruz, 2013; Dubberstein et al., 2020; Niazian y Niedbała, 2020; Sanwal et al., 2015; A. L. Teixeira et al., 2013). Además, la caracterización horizontal de las accesiones de café frente a *H. vastatrix* es una herramienta de gran importancia para la selección y utilización de genotipos que sean donadores de contengan genes de resistencia (van der Vossen et al., 2015). Por otro lado, entre las estrategias más económicas para el manejo integrado de la roya amarilla es el uso de genotipos resistentes, ya que es simple, económica y reduce el uso de plaguicidas en la caficultura y ambiente (Zambolim, 2016).

1.1. Objetivo general

Evaluar la variabilidad genética de accesiones de café (*C. arabica*) de la Colección de germoplasma de INIA, mediante la caracterización agromorfológica y sanitaria con énfasis a la *H. vastatrix*.

1.2. Objetivo específico

- a) Determinar el grado de variación de los caracteres vegetativos, reproductivos y fitosanitarios en 162 accesiones de *C. arabica*.
- b) Clasificar a 168 accesiones de *C. arabica* en base a su resistencia a *H. vastatrix* en condiciones de campo.
- c) Evaluar los componentes de la resistencia de 35 accesiones y cultivares de *C. arabica* procedente de la Colección de germoplasma en condiciones de laboratorio.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Café (*Coffea arabica*)

2.1.1. Origen y clasificación taxonómica

El género *Coffea* es miembro de la familia Rubiaceae que contiene a más 124 especies endémicas del trópico húmedo del África, propiamente de Madagascar, las Islas Comoras y Mascareñas, Asia y Australasia (Davis et al., 2019; Huded et al., 2020). Sin embargo, de todas las especies del género, solamente el *Coffea arabica* y *Coffea canephora* fueron domesticadas y cultivadas por los agricultores, probablemente hace más de 1500 años, en principio utilizándose como alimento y luego como bebida (Davis et al., 2019). Por otro lado, el *C. arabica* es la única especie se encuentra aislada geográficamente de las demás del género, producto de un posible cruzamiento interespecífico entre el *C. canephora* y *C. eugenoides* (Silvestrini et al., 2007). Además, el análisis citogenético del híbrido *C. arabica* ha confirmado que se trata de una especie alotetraploide ($2n = 4x = 44$) y con biología reproductiva autocompatible, mientras que, otras especies del género son diploides ($2n = 2x = 22$) y autoincompatibles (Lashermes et al., 1999, 2000). Según Davis et al. (2006); Linné y Salvius (1753) la clasificación taxonómica del café arabica es la siguiente:

- División : Angiospermae
- Clase : Eudycotiledoneae
- Subclase : Asteridae
- Orden : Gentianales
- Familia : Rubiaceae
- Subfamilia : Ixoroideae
- Tribu : Coffeae
- Género : Coffea
- Especie : *Coffea arabica* L.

2.1.2. Diversidad de cultivares del *C. arabica*

La producción mundial del *C. arabica* hace tan sólo una década se basó en líneas o cultivares derivados de las poblaciones genéticas del Typica (Cramer) y Bourbon (B. Rodr.) o del cruzamiento entre ellas, caracterizados por presenta una amplia variabilidad fenotípica para los rasgos de hábito de crecimiento, tamaño de la planta, color del cerezo, calidad de la bebida y adaptación ecológica (Aerts et al., 2017; Al-Khayri et al., 2019; Anthony et al., 2001, 2002; Avelino y Anzueto, 2020; van der Vossen et al., 2015). Entre los cultivares tradicionales de mayor adopción alrededor del mundo destacan el Bourbon, Typica, Caturra,

Sumatra, Maragogipe, Mundo Novo Pacas, Villa Sarchí y Catuaí, debido a que presentaban ventajas en la facilidad para desarrollar las labores culturales y permitía la reducción de los costos de producción mediante la implementación de un paquete tecnológico que involucre una mayor densidad de siembra establecida bajo un sistema a pleno sol y con el uso de fertilizantes (Avelino y Anzueto, 2020). Por lo tanto, la liberación de estos cultivares por los distintos programas de mejoramiento permitieron ampliar la base genética del café, pero direccionado al incremento de la productividad y a la obtención de cafés de excelente calidad de bebida, sin embargo, la mayoría de estos cultivares presentaron susceptibilidad a la gran mayoría de plagas y enfermedades, como la roya amarilla (*H. vastatrix*, Bert. & Brome), broca del café (*Hypothenemus hampei*, Ferrari) y ojo de gallo (*Mycena citricolor*) (Al-Khayri et al., 2019; Avelino et al., 2015; Chaparro et al., 2004; van der Vossen et al., 2015).

Como resultado de la aparición, dispersión y establecimiento de la roya amarilla (*H. vastatrix*, Bert. & Brome) en casi todas las regiones productoras del mundo (Avelino et al., 2018; McCook y Vandermeer, 2015; Santana et al., 2018; M. do C. Silva et al., 2006; Zambolim, 2016), los cultivares tradicionales se evidenciaron como altamente susceptible al patógeno (Avelino y Anzueto, 2020; Maia et al., 2017; Zambolim, 2016), tornando el mantenimiento de estas plantaciones inminentemente insostenible, debido a los costos elevados por el uso intensivo de fungicidas (Avelino et al., 2018; Botelho et al., 2010; McCook, 2006, 2009; McCook y Vandermeer, 2015; Sera et al, 2007a; M. do C. Silva et al., 2006). Por lo tanto, *H. vastatrix* se ha convertido en la mayor limitante para la producción del *C. arabica* (Bettencourt y Carvalho, 1968; Carvalho y Monaco, 1969; G. Carvalho et al., 2014; Maghuly et al., 2020; Zambolim et al., 2016; Zambolim, 2016).

Por otro lado, la amplia variabilidad de *H. vastatrix* (Zambolim, 2016), el significativo impacto económico y la reducción de la producción especialmente en los campos de pequeños agricultores (Maghuly et al., 2020) ha develado la necesidad de contar con cultivares resistentes que a mediano y largo plazo sean liberados para reemplazar paulatinamente a los cultivares que se tornaron susceptibles debido al cambio en la virulencia del patógeno a lo largo del tiempo (Zambolim et al., 2016). Por lo tanto, hoy en día, la durabilidad de la resistencia de los cultivares es difícil de predecir (Zambolim et al., 2016); por consiguiente, ha configurado como uno de los principales objetivos para los programas de mejoramiento genético en países como Brasil (IAC, IAPAR, UFV-EPAMIG, PROCAFÉ/MAPA), Colombia (CENICAFÉ), Costa Rica (CATIE/PROMECAFE/CIRAD), India (CCRI), Kenya (CRF), Tanzania (TaCRI), Ethiopia (IAR/JARC) and Angola/Portugal

(IAA/ICA-CIFC/ex ICT) (Avelino et al., 2015; Avelino y Anzueto, 2020; Bettencourt y Carvalho, 1968; M. do C. Silva et al., 2022a; van der Vossen et al., 2015; Zambolim, 2016).

Con la necesidad de ampliar la base genética del café principalmente para la obtención de genotipos resistentes a roya amarilla (van der Vossen et al., 2015), los programas de mejoramiento han realizado diferentes cruzamientos entre el Híbrido de Timor (HdT 832/1 y HdT 832/2) y los cultivares Caturra rojo, Villa Sarchí y Caturra amarillo, con el objetivo de introducir a la descendencia los genes S_{H1} , S_{H2} , S_{H4} , S_{H5} , S_{H6} , S_{H7} , S_{H8} y S_{H9} procedentes de las especies del *C. arabica* y *C. canephora* (Avelino et al., 2015; Avelino y Anzueto, 2020; Botelho et al., 2010; Carvalho, et al., 1989a, 1989b; Carvalho y Monaco, 1969; M. do C. Silva et al., 2022a; van der Vossen et al., 2015; Zambolim et al., 2000, 2016; Zambolim, 2016). A partir de estos cruzamientos se obtuvieron cultivares homogéneos, resistentes y muy productivos que actualmente conforman a los grupos genéticos de Catimores, Sarchimores, Colombia/Castillo regionales y Cavimores, los cuales, fueron liberados para la renovación de miles de hectáreas de café de distintas regiones productoras del mundo (Avelino y Anzueto, 2020). Sin embargo, algunos de estos cultivares, después de varios ciclos productivos se han mostrado susceptibles a la roya amarilla, quizás a causa de una alta presión de selección ejercida por la diversidad de cultivares resistentes, el cual, favorece una evolución paulatina en la estructura genética del patógeno (Avelino y Rivas, 2013; Sera et al., 2007a; M. do C. Silva et al., 2022; Várzea et al., 2008).

Finalmente, algunos de los cultivares de los grupos genéticos del Catimor, Sarchimor, Colombia/Castillo regionales y Cavimores han sido utilizados para realizar cruzamientos con especies silvestres y semi-silvestres con el objetivo de ampliar la base genética y obtener materiales híbridos F1 que aprovechen las ventajas del vigor híbrido (Valencia et al., 2017; van der Vossen et al., 2015). En Centroamérica a través del PROMECAFE-IICA, French Agricultural Research Center for International Development (CIRAD) y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) han desarrollado los híbridos que son llamados Centroamericano (H1) y Milenio, que es producto del cruzamiento entre un Sarchimor y Rume Sudán (especie semi-silvestre) que es el donde hay combinado los caracteres de alta productividad, resistencia a roya amarilla y alta calidad de la bebida (Avelino y Anzueto, 2020; Avelino y Rivas, 2013).

2.1.3. Banco de germoplasma de *Coffea*

El principal objetivo de un programa de mejoramiento de plantas es aumentar el rendimiento del cultivo a fin de garantizar la seguridad alimentaria en el futuro (Nguyen y Norton, 2020; Priyanka et al., 2021); por ende, entre los primeros pasos para iniciar

un programa de mejoramiento se encuentra: 1) la colecta del material vegetal, 2) el establecimiento y 3) la conservación del germoplasma (Benti, 2017). Tradicionalmente, el germoplasma del *Coffea* ha sido conservado en condiciones *ex situ* e *in situ*, es decir, mediante el establecimiento de bancos de germoplasma debido a la naturaleza recalcitrante de las semillas y protegiendo los bosques de café silvestres localizados en los centros de diversidad del café (Aerts et al., 2017; Anthony et al., 2007; Nair, 2010; Priyanka et al., 2021). Por lo tanto, la conservación del germoplasma posibilita la caracterización y evaluación del acervo genético del café, mediante la utilización de descriptores agronómicos y morfológicos que permiten obtener una información valiosa que oriente el desarrollo de nuevos cultivares (Atinafu y Mohammed, 2017b; Anthony et al., 2007; Ivoglo et al., 2008; Kumari et al., 2016; Silvestrini et al., 2007).

2.2. Biología, epidemiología y diversidad genética de *H. vastatrix*

2.2.1. Taxonomía y biología

A pesar de que *H. vastatrix* es considerada la enfermedad más devastadora del cultivo de café, muy poco se conoce sobre su origen evolutivo y las relaciones filogenéticas. D. N. Silva et al. (2012) utilizando el algoritmo NeighbourNet y SplitsTree, estudiaron 23 genomas y nueve bases de datos de secuenciación para *H. vastatrix*, clasificándolo dentro del phylum Basidiomycota, sub-phylum Pucciniomycotina, clase Pucciniomycetes, orden Pucciniales, familia Incertae. Los resultados taxonómicos del hongo concuerdan con evidencias moleculares reportados por Grasso et al. (2006) y McTaggart et al. (2016).

H. vastatrix se distingue por presentar un arreglo único de sus estructuras morfológicas, las uredosporas y teliosporas se encuentran unidas en un mismo soro uredospórico en forma de ramo que sobresale por los estomas (M. D. C. Silva et al., 2006; Talhinhos et al., 2017). Las uredosporas son comúnmente ovoides a reniformes, pared hialina y gruesa, lisa en lado ventral y con ornamentación equinulada (espinas de 150 a 300), o verrugosa en el dorso convexo con dimensiones entre 29.7 μ x 18.9 μ (mínimo) y 34.5 μ x 23.7 μ (máximo), unidas oblicuamente en la base mediante un punto pequeño llamado papiliforme (Berkeley y Broome, 1869; Gichuru et al., 2021; McCain y Hennen, 1984; Talhinhos et al., 2017; Zambolim, 2016). Las teliosporas generalmente se encuentran entre las uredosporas, éstas estructuras son bien diferenciadas cuando están completamente desarrolladas, tienden a ser pediceladas, desde esféricas a napiforme, suaves y con una protuberancia terminal en forma de papila, mide aproximadamente 12–27 μ (largo) x 15–27 μ (ancho), las paredes son lisas y delgadas de color amarillo pálido y gutuladas, se encuentran unidas al soro mediante un pedículo corto (Coutinho et al., 1995; Fernandes et al., 2009; Zambolim, 2016).

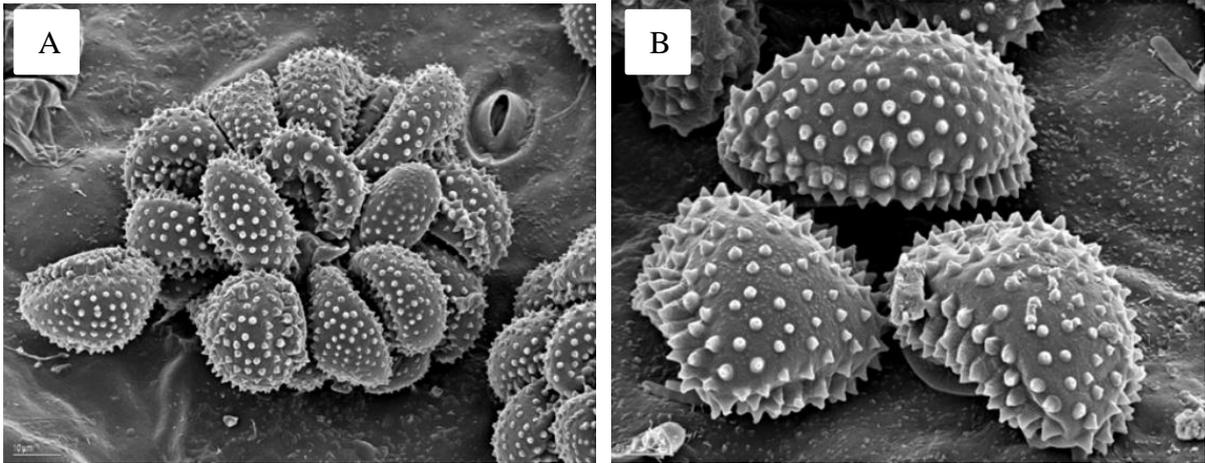


Figura 1. Vista microscópica de *H. vastatrix*. (A) Sori uredospórico formado alrededor de la estoma de la hoja. (B) Características de la uredosporas depositado en la superficie del envés de la hoja (Hindorf y Omondi, 2011).

2.2.2. Proceso de infección y ciclo de vida

La relación biotrófica entre *H. vastatrix* y *C. arabica* se inicia con la adhesión de las uredosporas al envés de las hojas (Azinheira et al., 2007; Hamer et al., 1988), a partir de este momento se establece una serie de señalizaciones físicas (dureza superficial, hidrofobicidad) y químicas (monómeros de cutina, cera epicuticular) que dependiendo del reconocimiento huésped-patógeno para fenotipo susceptible permite la germinación de las esporas y la emisión del tubo germinativo (Doehlemann et al., 2017); el cual, logra adaptarse adecuadamente a los estomas de la hoja mediante un apresorio (Agrios, 2005; Coutinho et al., 1993). En esta fase, para el éxito de la infección, las uredosporas de *H. vastatrix* necesita condiciones de temperatura entre 22 a 24 °C y un periodo de humedad medio de 24 horas en oscuridad (Capucho et al., 2013; Kushalappa, 1989). Resultados similares fueron obtenidos por Rayner (1961), quien determinó que el mayor porcentaje de germinación de uredosporas en condiciones de campo suele ocurrir en condiciones de agua libre que derivo de la lluvia, entre las 10 de la noche a ocho de la mañana del siguiente, a temperaturas promedios de 19 a 25 °C.

En presencia de agua libre, las uredosporas pueden iniciar su germinación a partir de las dos horas y pudiendo completar el proceso de penetración entre 24 a 48 horas después (Coutinho et al., 1993; Kushalappa, 1989; Rayner, 1961). Luego que la espora germina, ésta produce un apresorio que termina diferenciándose en una estructura especializada llamada hifa, que tiene por función invadir y crecer en la cámara subestomática la célula, seguidamente ésta desarrolla una vesícula en forma de ancla que más tarde genera de dos a cuatro

ramificaciones laterales que producen las HMC (células madres haustoriales) que dan origen a un haustorio responsable de la progresión de la enfermedad en el parénquima esponjoso y empalizada, e incluso puede llegar a colonizar la epidermis superior (Ramiro et al., 2009; Talhinhos et al., 2017). Debido al intenso crecimiento de las hifas en la cavidad inter e intracelular, el soró uredospórico emerge por los estomas conteniendo a las uredosporas (inóculo secundario) y teliosporas (fase sexual) (Kushalappa, 1989; M. C. Silva et al., 2015; Talhinhos et al., 2017). Inicialmente, se visualiza en el envés de las hojas unas pequeñas lesiones cloróticas (color amarillo pálido) que con el tiempo aumentan de tamaño. Al final del periodo de latencia, la uredina forma las características uredosporas que son color amarillo-anaranjado y de aspecto polvoriento que fácilmente pueden ser liberados por el vientos, lluvias, insectos y animales y el hombre (Maia et al., 2017; Zambolim, 2016).

El ciclo de vida de *H. vastatrix* ha sido un tópico muy estudiado, especialmente en cuanto a la relación que existe entre la temperatura, el periodo de incubación (PI) y periodo de latencia (PL) del hongo; ya que, su mayor duración exigiría medidas de control químico o genético en condiciones de campo (Leguizamón-Caycedo et al., 1998). Estas asociaciones generalmente se han analizado mediante regresiones lineales, utilizándose diferentes gradientes de temperatura y humedad como variables predictoras para determinar el establecimiento y desarrollo del patógeno en el huésped. Varios investigadores han encontrado marcadas diferencias en el periodo de incubación y periodo de latencia en función del huésped susceptible o resistente, estado nutricional de la planta, razas fisiológicas del hongo utilizadas en el estudio y factores ambientales predisponentes.

Leguizamón-Caycedo et al. (1998) estudiaron el comportamiento de *H. vastatrix* en tres zonas cafetaleras de Colombia ubicadas a 1 010, 1 310 y 1 600 m s.n.m, determinando que el periodo de incubación y periodo de latencia para el ensayo global fue de 21,4 y 34,0 días. Por su parte, Waller (1982) encontró que el periodo entre la infección y la aparición del síntoma del hongo puede ocurrir a partir del séptimo día y prolongarse hasta 35 días después. De otro lado, Rayner (1961) reportó que el periodo de incubación medio puede variar entre 21 a 49 días, pudiendo incrementarse el tiempo en función de la temperatura y humedad. Finalmente, Kushalappa (1989) encontró en sus ensayos de infección que el tiempo que transcurre entre la infección y el primer síntoma es de 10 a 15 días, mientras que para visualizar los primos signos del hongo normalmente ocurre 15 a 24 días después de las inoculaciones de *H. vastatrix* en discos de hojas de café.

Otro de los aspectos que determina el tiempo del periodo de incubación y periodo latencia es la variabilidad genética de *H. vastatrix*. Estudios desarrollados por Rayner

(1961), encontró que el periodo de incubación para la raza I fue de 19 y 63 días, mientras que para la raza II fue entre 26 a 48 días después de la inoculación en plantas susceptibles sometidos a condiciones de laboratorio, invernadero y campo abierto. En un trabajo similar, Rodriguez y Moreno (2002) utilizaron la raza II y XXII de *H. vastatrix* para cuantificar el periodo de incubación y periodo de latencia, ellos determinaron que el periodo de incubación fue de 14 y el periodo de latencia de 28 días, respectivamente. Además, los mismos investigadores reportaron diferencias no significativas para la interacción entre las variables de periodo de incubación, periodo de latencia y razas evaluadas. Por otro lado, Zambolim et al. (2000) cuantificó el periodo de incubación para las razas fisiológicas I, II, III y XIII de *H. vastatrix* en el germoplasma derivado del Híbrido Timor más un testigo cultivar Catuaí rojo, estableciendo un rango de tiempo entre 24 y 27 días para las líneas resistentes de café Catimor y 18 días para el testigo.

2.2.3. Epidemiología

El proceso epidemiológico de *H. vastatrix* se compone de repetibles ciclos de infección durante toda la fase fenológica del cultivo (Kushalappa y Eskes, 1989; Maia et al., 2017). Estos ciclos generalmente son llamados como procesos monocíclicos, que, a su vez, componen un gran proceso policíclico, que es caracterizado por generar cambios morfológicos a nivel del hongo y del hospedante (Kushalappa, 1989). *H. vastatrix* debido a su modo de infección es considerada como una roya autoica, precisamente por no presentar la fase picnial y aecia, es decir, en la planta sólo ocurre la aparición de estructuras como uredia, telia y basidia (Zambolim, 2016). Por lo tanto, epidemiológicamente las uredosporas son las únicas estructuras de importancia, debido a que causan infecciones severas en el follaje, ocasionando fuerte defoliación, reducción de la producción y hasta posible muerte de las ramas plagiotrópicas y de la planta (Cerdeira et al., 2017; Kushalappa, 1989; Zambolim, 2016).

Para las condiciones de selva tropical y subtropical, la periodicidad estacional del progreso de la enfermedad está condicionada por dos factores: 1) la intensidad y distribución de las lluvias, en especial de las gotas finas que caen al inicio del periodo de floración que humedece las hojas y 2) temperaturas que oscilan entre 22 a 27 °C (Avelino et al., 2006; Capucho et al., 2013; Gichuru et al., 2021; Kushalappa, 1989; Kushalappa y Eskes, 1989; Mendgen et al., 2000; Nutman et al., 1963; Toniutti et al., 2017; Waller, 1982). Asimismo, el nivel de daño de la enfermedad se asocia a factores como la altitud, susceptibilidad del genotipo, densidad estomática, variabilidad del patógeno, densidad de siembra, abundante follaje joven, carga frutífera, condición nutricional de la planta, fertilización, desbalance entre boro (B) y potasio (K), densidad y tipo de sombra permanente, deposición de uredosporas en el follaje de

la planta, dispersión de las uredosporas en el aire dentro del sistema de cultivo del café y humedad del suelo (Avelino et al., 2006, 2018; Belachew et al., 2020; Boudrot et al., 2016; V. L. de Carvalho y Chalfoun, 2001; Maia et al., 2017; Rodrigues et al., 2014; Talamini et al., 2003; Toniutti et al., 2017; Vasco et al., 2018; Zambolim, 2016).

En Perú, la epidemia inicia con la caída de las primeras lluvias, coincidiendo con la etapa de la floración del café entre julio y septiembre (Alvarado-Huamán et al., 2020; Borjas-Ventura et al., 2020). El follaje húmedo debido a las lluvias finas, estimulan la germinación y penetración de las uredosporas que fueron liberadas, transportadas y depositadas en la superficie de las hojas por acción del viento, las lluvias o por el rocío (Meredith, 1973). Las lesiones latentes y necróticas que permanecieron en las hojas del ciclo productivo anterior, también son reactivadas, debido a las películas de agua que se formaron sobre las hojas debido a las lluvias, generando poca esporulación alrededor de la lesión, el cual, libera más uredosporas al sistema productivo (Avelino et al., 2020; Boudrot et al., 2016). En conjunto, las uredosporas transportadas de un cultivo a otro y las que son liberadas por las lesiones viejas presentes en las hojas del mismo cultivo constituyen el inóculo primario o residual que es el responsable del inicio de la epidemia (Avelino y Rivas, 2013).

Posteriormente, la enfermedad experimenta una fase de crecimiento acelerado que coincide con la etapa del desarrollo de los frutos, caracterizado por una alta tasa de infección y por observarse lesiones translucidas de 2 a 3 mm de diámetro que poco a poco son cubiertas con el micelio del hongo, alcanzando hasta el 25 % del área de la lesión, más tarde, estas las lesiones crecen y coalescen con otras lesiones (Gichuru et al., 2021). Las lesiones pueden distribuirse en toda la superficie del limbo, el ápice y borde de la hoja, haciéndose más recurrente en los tejidos periféricos debido a que son células meristemáticas y porque además son áreas que permanecen húmedas durante los días templados o forman pequeñas películas de agua durante las noches con abundante neblina (Rodrigues Jr. 1980; Kushalappa y Eskes 1989; Agrios 1995; Silva et al., 1999). En este periodo la intensidad y la duración de las lluvias es el principal factor para la propagación de la enfermedad (Avelino et al., 2004). En el país, la mayoría de los sistemas de cultivo de café utilizan como sombra permanente a la guaba (*Inga spp*) o una mezcla de árboles nativos propios de la zona; que funcionan como interceptores de las lluvias, reduciendo la caída de gotas de agua en el follaje del café y por ende la dispersión del inóculo de la roya amarilla (Avelino et al., 2004). En regiones donde las lluvias presentan mayor duración e intensidad, la sombra tiene un efecto negativo, ya que, en la copa se generan chorros de agua que, al caer en dirección a la copa del café, golpean las hojas y liberan grandes masas de uredosporas de roya amarilla que son esparcidas entre el follaje de las plantas y en las

calles del sistema agrícola (Avelino et al., 2004, 2020; Boudrot et al., 2016). Asimismo, las gotas grandes y chorros de agua liberadas por la sombra tienden a impactar en el suelo, permitiendo la dispersión de enfermedad entre hojas y plantas vecinas, ubicadas en la misma hilera (Zambolim, 2016).

A pesar de que el progreso de la enfermedad presenta una marcada diferencia entre cultivares resistentes y susceptibles, para la tercera fase, la incidencia tiende a incrementarse hasta alcanzar el máximo nivel para el final del ciclo productivo y al inicio de la etapa de descanso, situándose temporalmente entre abril y agosto para plantaciones de café establecidos a altitudes de 600 y 1000 m s.n.m. (Alvarado-Huamán et al., 2020; Borjas-Ventura et al., 2020; Rodrigues et al., 2014). Las plantaciones susceptibles sin ningún tipo de control suelen llegar al más rápido al máximo nivel de daño, observándose en las hojas grandes lesiones cubiertas de abundante micelio, que compromete a más del 35 % del área foliar, ocasionando la caída de las hojas y por ende una fuerte defoliación con posterior muerte de las ramas productivas e incluso la muerte de la planta (Capucho et al., 2013; Kushalappa, 1989; Waller, 1982; Zambolim, 2016).

Finalmente, la incidencia de la enfermedad experimenta un descenso acelerado a efecto de la defoliación y de la poca humedad de hoja en la temporada debido a la escasez de las lluvias (precipitación < 50 mm) (Araño-Leyva et al., 2017; Capucho et al., 2013; Zambolim, 2016). Muchos investigadores han estudiado el efecto de la roya amarilla sobre el rendimiento del café; reportando que, la reducción de la producción es fuertemente influenciada por la alta caída de hojas producto del daño ocasionado por la enfermedad.

Generalmente, la reducción de la producción debido a la defoliación se encuentra en 26 y 38 % para el ciclo productivo actual y para el siguiente (Brown et al., 1995; Capucho et al., 2013; Cerda et al., 2017; Waller, 1982). Asimismo, las plantas de café pueden tornarse más susceptible a plagas y enfermedades y a efectos ambientales adversos en los siguientes periodos productivos, debido a la pérdida de las reservas de carbohidratos que permiten el correcto funcionamiento fisiológico de las plantas (Gichuru et al., 2021; Toniutti et al., 2017; Waller, 1982).

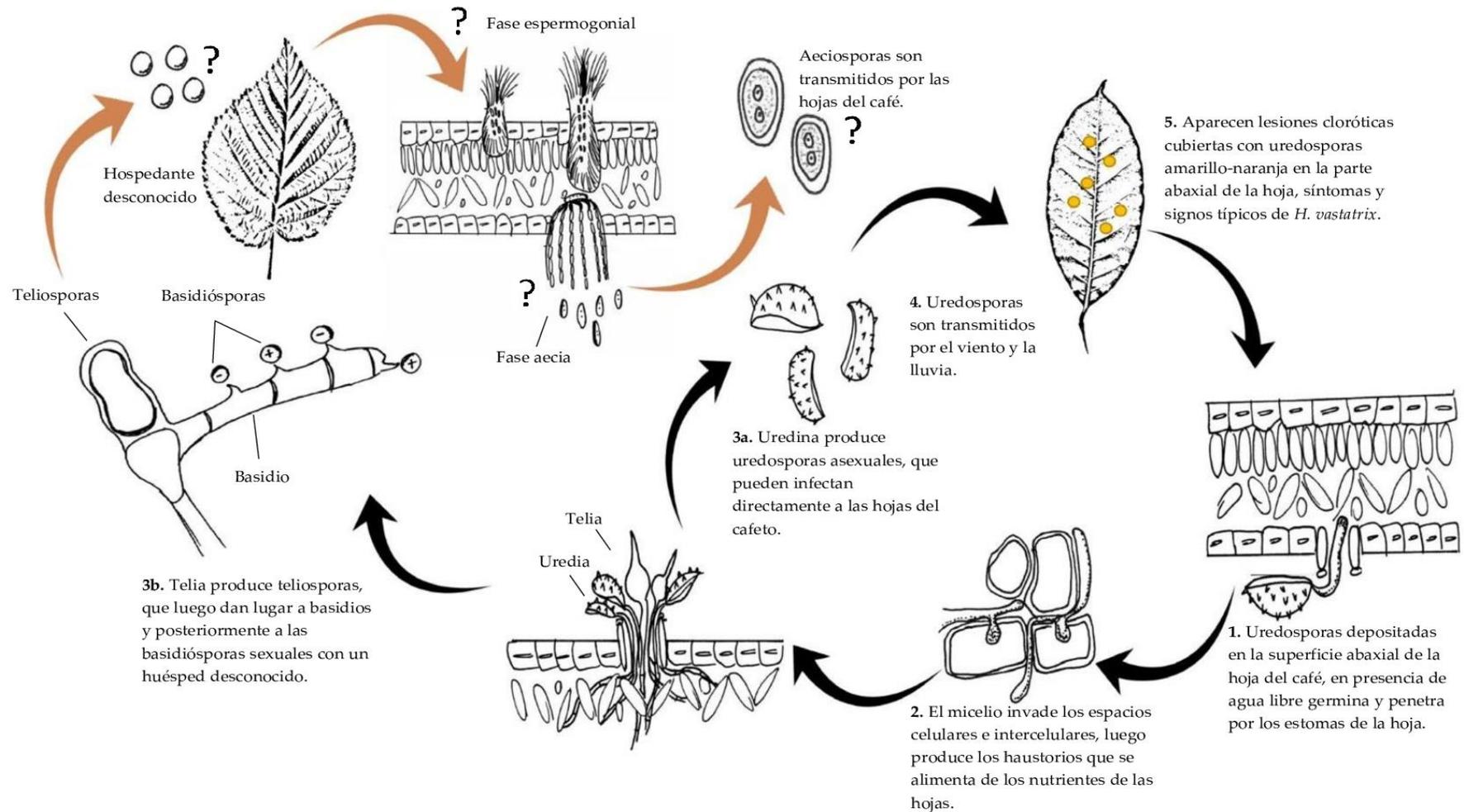


Figura 2. Ciclo de vida de *H. vastatrix* e hipótesis de la ocurrencia de la fase aecia en algún hospedante desconocido (Koutouleas et al., 2019).

2.2.4. Variabilidad genética de *H. vastatrix*

Desde la aparición de *H. vastatrix* en las regiones cafetaleras del mundo, el control de la enfermedad mediante el uso de cultivares resistentes ha sido un desafío (Costa et al., 2007), debido principalmente a la alta tasa de mutación y a la capacidad adaptativa del patógeno a diversas zonas agroecológicas (Cabral et al., 2016; Quispe-Apaza et al., 2021). La posibilidad del surgimiento de nuevas variantes capaces de vencer los mecanismos de resistencia de los cultivares derivados del Híbrido Timor, podrían tornar a las plantas de café como susceptibles al patógeno a largo plazo (Capucho et al., 2009). El patógeno ha sido ampliamente estudiado en varios países productores, utilizando marcadores moleculares (RAPD, AFLP, RFLP, ITS y Microsatélites) a partir de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) para estimar la diversidad genética y la estructura de la población (Gouveia et al., 2005).

Asimismo, estudios realizados por Mayne (1932) y D'Oliveira (1954) han identificado más de 55 razas fisiológicas de *H. vastatrix* que son mantenidos en el Centro de investigaciones de las Royas del Café (CIFC) (M. D. C. Silva et al., 2006; Zambolim, 2016). Brasil, uno de los países que más ha investigado la roya del café, determinaron la prevalencia de 15 razas fisiológicas en plantas de *C. arabica* y *C. canephora*: I_(v2, v5), II_(v5), III_(v1, v5), VII_(v3, v5), X_(v1, v4, v5), XIII_(v5, v7), XV_(v4, v5), XVI_(v1, v2, v3, v4, v5), XVII_(v1, v2, v5), XXII_(v5, v6), XXIII_(v1, v2, v4, v5), XXIV_(v2, v4, v5), XXV_(v2, v5, v6), XXXIII_(v5, v7 o v5, v7, v9) y XXXVII_(v2, v5, v6, v7, v9) (Zambolim, 2016). En Colombia, hasta la actualidad se estimado la existencia de 10 razas de roya, sin embargo, los investigadores han demostrado la presencia de las razas II_(v5), XXII_(v5, v6), XXV_(v2, v5, v6), XXIII_(v1, v2, v4, v5), XVII_(v1, v2, v5) y XXX_(v5) (Cristancho-Ardila et al., 2007). En Venezuela, los patólogos inocularon uredosporas roya en el cultivar Bourbon y el clon 32/1, constatando la presencia de las razas I_(v2, v5) y II_(v5) (Silva Acuña et al., 1997). En el Perú, después de la catástrofe del 2013, se han realizado grandes esfuerzos para estudiar la diversidad y estructura de las poblaciones de roya de las principales regiones productoras de café, determinando la existencia de haplotipos ancestrales que corresponden a las razas I_(v2, v5), II_(v5), y XXII_(v5, v6) (Quispe-Apaza et al., 2017, 2021)

2.3. Resistencia a la roya del café

En los países productores, los cultivares resistentes han tenido un rol importante para la renovación de las plantaciones de café atacadas por la enfermedad. En este contexto, los cultivares resistentes es el bien más utilizado por los agricultores, además, que constituye el método más eficiente y económico para contrarrestar el avance de la enfermedad (Zambolim, 2016). La mayoría de los cultivares resistentes liberados en el mundo, han sido

mejorados mediante la introgresión de los genes de resistencia provenientes del Híbrido de Timor, Icatu (Zambolim et al., 2016) y actualmente con los genes del *C. liberica* (Valencia et al., 2017); que con su introgresión ha proporcionado resistencia con durabilidad significativa en varias regiones que han sido probados; un ejemplo de esto es, el lanzamiento en Brasil del Catuaí S_{H3} que presenta resistencia completa a *H. vastatrix* (Fazuoli et al., 2019).

Los genes de resistencia del café hacia *H. vastatrix* son denominados como “ S_H ” y se encuentran trabajando de forma individual o en combinación (Kushalappa y Eskes, 1989; Maia et al., 2017). En el *C. arabica* se han identificado los genes S_{H1} , S_{H2} , S_{H4} y S_{H5} , mientras que, el *Coffea canephora* agrupa los genes S_{H6} , S_{H7} , S_{H8} y S_{H9} , los cuales están presente en el Híbrido de Timor y sus híbridos interespecíficos (Maia et al., 2017; Zambolim, 2016; Zambolim y Caixeta, 2021). Asimismo, el gen S_{H3} fue detectado en el cultivar S.795 derivado de las poblaciones nativas del *Coffea liberica* (Al-Khayri et al., 2019; Carvalho et al., 1989a).

Algunos estudios realizados en Brasil, han determinado diferentes niveles de resistencia cuantitativa en cultivares derivados del germoplasma de Catuaí e Híbrido de Timor, como es el caso del Tupi IAC 1669-33 (Del Grossi et al., 2013). Recientemente se ha reportado la susceptibilidad de algunos de los cultivares de Catimor y Sarchimor que anteriormente eran consideradas con resistencia completa a todas las razas fisiológicas de *H. vastatrix* (Sera et al., 2010; M. do C. Silva et al., 2022).

2.3.1. Resistencia genética

El patosistema *H. vastatrix-Coffea* sigue los conceptos de “resistencia gen por gen” y “resistencia vertical y horizontal”, propuestos por Flor (1971) y Van der Plank (2012), respectivamente. La primera teoría propone que, “por cada gen dominante que confiere resistencia “*R*” a la planta, existe un gen dominante que corresponde a la avirulencia del patógeno “*Avr*” (Agrios, 2005; Vale et al., 2001; Zambolim y Caixeta, 2021). Por lo tanto, es posible determinar la variabilidad de la roya amarilla mediante el estudio de la fenotipificación de la reacción de resistencia en un conjunto de variedades de café cuando éstas son inoculadas con diferentes aislados del patógeno (Burbano-Figueroa, 2020; Zambolim y Caixeta, 2021). Entonces, el concepto de “resistencia gen por gen” puede ser explicado mediante el modelo llamado “inductor-receptor”, que funciona para el reconocimiento de la proteína del patógeno, el cual, al entrar en contacto con el tejido del hospedero puede ser reconocido (reacción de compatibilidad) o no reconocido (reacción de incompatibilidad) por el receptor (Keen, 1990). Una reacción de compatibilidad entre el gen “*R*” y gen “*v*”, implicaría una reacción de defensa por parte del hospedero, que generalmente está asociada con la reacción de hipersensibilidad (HR, *por sus siglas en inglés*) propio de los

cultivares resistentes (Burbano-Figueroa, 2020). La HR es un mecanismo de defensa poshaustorial (Ramiro et al., 2009), caracterizada por restringir el crecimiento del patógeno mediante la muerte celular programada (PCD, *del inglés Program cell death*) en los sitios de infección (M. do C. Silva et al., 2022). En el *C. arabica*, las células estomáticas y del mesófilo de la hoja son las que reciben y ejecuta la información ante la infección de alguna raza de *H. vastatrix*, produciendo lesiones cloróticas sin esporulación, manchas necróticas o ausencia de síntomas (M. D. C. Silva et al., 2006). En contraste, una reacción de incompatibilidad debido a la mutación del gen de avirulencia “*Avr*” del patógeno, conllevaría a iniciar un proceso agresivo de infección, colonización y esporulación del hongo (Sánchez, 2005).

Por otro lado, Van der Plank (2012) plantea la existencia de dos tipos de resistencia, una de tipo cualitativa (vertical) y otra de tipo cuantitativa (horizontal). La resistencia cualitativa o monogénica en la especie *Coffea spp.*, está dominada por el efecto de los genes dominantes S_{H1} , S_{H2} , S_{H3} , S_{H4} , S_{H5} , S_{H6} , S_{H7} , S_{H8} y S_{H9} y su acción de reconocimiento es específica contra los genes dominantes de virulencia v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5 , v_6 , v_7 , v_8 y v_9 del patógeno, confiriendo protección completa a las razas fisiológicas de *H. vastatrix* (Eskes, 1989; Sera et al., 2022; Vanderplank, 2012; Zambolim et al., 2016). Este tipo de resistencia es preferida por los mejoradores debido a la fácil introgresión de los genes y a la alta heredabilidad que muestran la descendencia (Botelho et al., 2010; M. do C. Silva et al., 2022; R. A. Silva et al., 2018). En Colombia, desarrolló el *C. arabica* var. Colombia utilizando derivados del Híbrido de Timor genotípicamente diferentes para resistencia, lo cual derivó en mejor protección frente a las razas fisiológicas de roya detectada en ese país (Carvalho et al., 1989a). Por lo tanto, la mejora del café se basó en el conocimiento de los mecanismos de la herencia de la resistencia cualitativa, ya que, mediante retrocruzamiento del germoplasma del Híbrido de Timor con cultivares susceptibles de *C. arabica*, se han logrado transferir con éxito los genes S_{H1} , S_{H2} , S_{H4} y S_{H5} individualmente o en combinación a los nuevos cultivares de Catimor, Sarchimor, Colombia/Castillo R y Cavimor (Carvalho et al., 1989b; Sera et al., 2022; Zambolim, 2016). Por lo tanto, los genes “ S_H ” en estado homocigota resultan en fenotipos de café con resistencia completa hacia razas específicas de *H. vastatrix*; sin embargo, este tipo de resistencia no es durable en el tiempo, ya que, una mínima modificación en los genes de avirulencia del patógeno debido a mutaciones o a una alta presión de selección podría incurrir en el quiebre de la resistencia de los genes “ S_H ”, determinando que las plantas presenten fenotipo con resistencia cuantitativa (Del Grossi et al., 2013; Sera et al., 2010; Shigueoka et al., 2014; Zambolim, 2016). Contrariamente a la resistencia cualitativa; la resistencia cuantitativa o poligénica está gobernada por la acción de muchos genes, donde la interacción entre las razas

del patógeno y las especies del hospedero no es específica, es decir, el fenotipo de reacción de la planta es uniforme para todos los genotipos del patógeno (Burbano-Figueroa, 2020). La resistencia no específica se caracteriza por ser estable y duradera en el tiempo, aunque su aplicación en los programas de mejora genética es complejo y difícil debido principalmente a los mecanismos de herencia, el cual es controlada por el loci de carácter cuantitativo (QTL, *por sus siglas en inglés*), similar a los que presentan los rasgos de producción, precocidad y calidad (Costa et al., 2007). Entonces, la resistencia no específica en el cultivo de café utiliza un mecanismo general para dificultar la infección, penetración, colonización y esporulación de *H. vastatrix*, resultando en menor número de tejido foliar lesionado, menor tasa de producción de uredosporas, mayor dilatación del periodo de incubación y latencia y menor grado de defoliación de las plantas (Costa et al., 2007; Vanderplank, 2012).

2.3.2. Resistencia de campo

Este tipo de resistencia también se conoce como resistencia horizontal, resistencia cuantitativa, resistencia incompleta, resistencia duradera o resistencia no específica, es de difícil estudio pero de gran interés para los mejoradores y fitopatólogos (Burbano-Figueroa, 2020; M. D. C. Silva et al., 2006), ya que en las plantas se presenta como un mecanismo de escape frente a la enfermedad, lo cual no está relacionada a interacciones moleculares y bioquímicas del patosistema (Willoquet et al., 2017). Por lo tanto, la resistencia de campo puede originarse debido a tres mecanismos: 1) epistasis, que corresponde a la interacción entre genes no alélicos, donde uno de los genes involucrados suprime la acción del otro gen, 2) rasgos morfológicos y/o fisiológicos de la planta y 3) variaciones ambientales (M. D. C. Silva et al., 2006; Vale et al., 2001). Algunos mecanismos se han podido observar en el café, donde las plantas en etapa de crecimiento y desarrollo y con menor carga fructífera suelen presentar menor intensidad de daño por la enfermedad de la roya amarilla. Además, los cultivares asociados con el desprendimiento de hojas tienden a retrasar la epidemia y por ende a presentar menor intensidad de daño (Willoquet et al., 2017). Las variaciones ambientales también han desempeñado un rol para el escape de la planta a la enfermedad, por ejemplo, importantes modificaciones en la precipitación y temperatura podrían condicionar al patógeno reduciendo o ampliando su rango de acción. Asimismo, las variaciones atmosféricas también podrían determinar en una menor o mayor agresividad del patógeno. Por otro lado, la resistencia de campo puede ser cuantificada en uno o varios ciclos de la enfermedad, especialmente en la etapa de epidemia severa y utilizando parámetros que componen la resistencia cuantitativa como la incidencia, índice de intensidad de la enfermedad (severidad), defoliación, frecuencia de infección, periodo de incubación y de latencia, producción de esporas y periodo de

esporulación (Burbano-Figueroa, 2020). Estudios de resistencia en campo han fenotipificado la expresión del genotipo cuando es sometido a una amplia exposición por la enfermedad, determinando los niveles de resistencia del café en base a la variación de los síntomas y signos, que van desde una ligera reducción en el crecimiento del patógeno hasta poco crecimiento del patógeno (Vale et al., 2001). Por lo tanto, en base a la reacción del café frente a *H. vastatrix*, se clasifican en altamente resistentes (HR, *por sus siglas en inglés*), moderadamente resistentes (MR, *por sus siglas en inglés*), ligeramente resistentes (SR, *por sus siglas en inglés*), susceptibles (S, *por sus siglas en inglés*) o altamente susceptibles (HS, *por sus siglas en inglés*) (Sera et al., 2022).

2.3.3. Tolerancia

Es uno de los principales mecanismos de defensa de las plantas contra los patógenos, definiéndose como la habilidad del hospedero para reducir al mínimo el efecto de la enfermedad en el crecimiento y producción de la planta, a pesar de mantener una carga significativa de la población del patógeno y presentar síntomas y signos que van desde ausentes hasta leves (Pagán y García-Arenal, 2018; Paudel y Sanfaçon, 2018).

2.3.4. Métodos de inoculación

H. vastatrix es un parasito obligado que necesita del tejido vivo del hospedante para sobrevivir y desarrollarse con normalidad. Debido al particular mecanismo de sobrevivencia y al rápido surgimiento de razas fisiológicas del patógeno, se han desarrollado distintas metodologías *in vivo* y/o *in vitro* que han permitido acelerar el proceso de identificación y caracterización de genotipos resistentes. Los principales métodos de inoculaciones artificiales que se utilizaron para la evaluación de progenies de café en condiciones de invernadero y laboratorio tenemos a la aplicación de suspensión de uredosporas de roya amarilla en plantones, discos foliares (Eskes y Toma-Braghini, 1982) y hojas separadas (Capucho et al., 2005), mantenidas en cámara húmeda. Estos tres métodos permiten controlar eficientemente las condiciones de temperatura y humedad para el desarrollo de los síntomas y signos en el tejido vegetal; además, te garantiza la inocuidad del procedimiento debido a una baja contaminación de hongos saprofitos que puedan deteriorar el tejido utilizado para el estudio. Sin embargo, el método propuesto por Capucho y colaboradores (2005) presenta ventajas en cuanto a la practicidad operacional, buena distribución del inoculo en la hoja, una razón de infección igual a uno y la utilización de pequeñas cantidades de uredosporas y material vegetal, lo cual permite evaluar una mayor cantidad de genotipos de café. En general, las inoculaciones se ha desarrollado para evaluar la resistencia temprana de progenies avanzadas derivados de cruzamientos entre el cultivar susceptibles y germoplasma del Híbrido de Timor

(Álvarez L. y Alvarado A., 2002; Capucho et al., 2009; Eskes, 1983; Santacreo, 1989; D. G. Silva et al., 2000; M. B. Silva et al., 2000; Toniutti et al., 2017; Valencia et al., 2017), producción de uredosporas para establecer ensayos de patogenicidad e identificación de razas fisiológicas de roya amarilla (Rodríguez y Moreno, 2002; Silva Acuña et al., 1997; D. G. da Silva et al., 2000), estudiar el periodo de incubación y periodo de latencia (Eskes y Carvalho, 1983; Eskes y Da Costa, 1983), determinar la virulencia y agresividad de los aislados de roya amarilla (Eskes, 1983; Rozo et al., 2012), identificar los marcadores genéticos ligados a la resistencia (Prakash et al., 2004) y para determinar el efecto de protección de los fungicida contra la enfermedad (Rozo y Cristancho, 2010).

2.4. Antecedentes de la caracterización utilizando variables agromorfológicas para genotipos de *C. arabica*

El estudio de la diversidad basado en múltiples rasgos o características puede ser usado para la identificación y clasificación de accesiones (Aghaee et al., 2010), estos rasgos pueden ser agromorfológicos (Atinafu y Mohammed, 2017a, 2017b; Dutra Giles et al., 2019; Fonseca et al., 2006; Giles et al., 2018; Nair, 2010; Tounekti et al., 2017; WeldeMichael et al., 2013; Weldemichael et al., 2017), físicos (Barbin et al., 2014; Nakilcioğlu-Taş y Ötleş, 2019), químicos (Aguiar et al., 2005; Silvarolla et al., 2000), sensoriales (Nadaleti et al., 2022; Souza et al., 2018), bioquímicos (Tounekti et al., 2018) y/o moleculares (Ogutu et al., 2016; Prakash et al., 2005; R. A. Silva et al., 2018; Silvestrini et al., 2007; Valencia et al., 2017; Zhang et al., 2021). Cada grupo de rasgos tiene sus propias ventajas y desventajas, y no hay una única manera para caracterizar y agrupar a las variedades (Mohammadi y Prasanna, 2003). El uso de las técnicas dependerá del tiempo y del dinero disponible (Gouy et al., 2015). El uso de rasgos agromorfológicos es común para describir y clasificar los bancos de germoplasma (Kumari et al., 2016), porque es relativamente simple y de bajo costo (Parsaeian et al., 2011). Algunos estudios han reportado que la caracterización y clasificación de plantas basada en rasgos agromorfológicos son similares a la clasificación basada en técnicas moleculares (Zafar-Pashanezhad et al., 2020). Según (Atinafu y Mohammed, 2017b), la recopilación de una grande cantidad de datos agromorfológicos podría proporcionar información suficiente para la caracterización eficiente de la diversidad del café.

El análisis multivariado (AM) y las técnicas de análisis de componentes principales (ACP), de análisis de agrupamiento (AG) y la de correlación son las más comunes para el estudio de la diversidad de diferentes especies a través de rasgos agromorfológicos. Estas técnicas han sido utilizadas para clasificar plantas fibrosas (Adebo et al., 2015), cereales (Aghaee et al., 2010; Kumari et al., 2016), oleaginosas (Parsaeian et al., 2011), leguminosas

(Gupta et al., 2015), solanáceas (Castañón-Nájera et al., 2008; Castillo-Batista et al., 2017), gramíneas (Gouy et al., 2015) y herbáceas (Heydari et al., 2019).

La diversidad del café también ha sido estudiada a través de rasgos agromorfológicos usando técnicas multivariadas. En Egipto, (Atinafu y Mohammed, 2017b) caracterizaron y evaluaron las diferencias morfológicas de 124 accesiones usando 26 rasgos cuantitativos a través de AC; en un estudio similar; (Atinafu et al., 2017) evaluaron la variación de accesiones de café usando los coeficientes fenotípicos y genotípicos; (Olika et al., 2011) evaluaron la variación genética de café de 40 accesiones de café usando el método de estimación de componentes de varianza; y (WeldeMichael et al., 2013) estudiaron la variabilidad genética de 49 accesiones usando análisis de varianza, AG y ACP. En Arabia Saudí, (Tounekti et al., 2017) evaluaron la diversidad genética de 19 accesiones usando técnicas de ACP y AG. En Brasil, (Covre et al., 2016) estudiaron la diversidad genética de 33 genotipos a través de análisis de varianza, correlaciones fenotípicas y AG; (Dalcomo et al., 2015) estimaron la diversidad genética de 22 genotipos de café usando AG y ACP; (J. A. Silva et al., 2016) evaluaron la divergencia genética de 100 genotipos de café usando 6 rasgos agro morfológicos por análisis multivariados; (Giles et al., 2018) usaron rasgos morfo anatómicos; (Fonseca et al., 2006; Ivoglo et al., 2008; A. L. Teixeira et al., 2013) también estudiaron la divergencia genética del café en Brasil usando análisis multivariados. En Guatemala, (Nakamura et al., 2013), estudiaron la variación de 44 genotipos de café usando 18 características agromorfológicas a través de la técnica de ACP y AG. Por último, en Perú, (Alvarado et al., 2017) evaluaron las características agronómicas de 95 accesiones de un banco de germoplasma en Chanchamayo utilizando análisis multivariado de ACP y AG.

2.5. Antecedentes de la caracterización y/o evaluación de la resistencia de genotipos de *C. arabica* a la roya con inoculación natural

Bajo condiciones campo y en presencia de inóculo natural de roya amarilla se han desarrollados distintos estudios con la finalidad de evaluar, identificar y seleccionar genotipos con buen rendimiento productivo y resistencia durable a *H. vastatrix*. Los parámetros que a menudo se han utilizado para medir la resistencia en campo son: la incidencia, la severidad, la defoliación y la cantidad de esporas producidas por área foliar. En Colombia, Alvarado-Alvarado (2004) observó niveles de resistencia incompleta a roya amarilla en 100 progenies F5, F6 y F7 de café; Castillo y Alvarado (1997), compararon la resistencia de 22 progenies derivados del Híbrido de Timor con las variedades Caturra y Colombia, determinando que la resistencia está relacionada con la aptitud del genotipo para mantener el follaje, además, observó que las progenies resistentes iniciaron entre 4 a 6 meses después la epidemia. Brasil es

otro de los países en el continente que también han desarrollado variedades mejoradas; Por ejemplo, Botelho et al. (2010) seleccionó 3 progenies F4 en base al vigor productivo y resistencia no específica, determinando incidencias y severidades de 0 a 12 % y 0 a 1.6, respectivamente durante 3 años de evaluación; Petek et al. (2006), identificó que la progenie PRFB 2-27-1/F5 presentó resistencia simultánea a roya y cercospora; Sera et al. (2007b) evaluó 21 árboles de café con genes de resistencia S_{H3} en combinación con otros genes, determinando que resistencia completa y durable en el estado de Paraná; Sera et al. (2010) verifico la resistencia completa e incompleta de 12 cultivares IAPAR, observando que el algunos de estos cultivares habían cambiado su nivel de resistencia cuando eran enfrentados a poblaciones locales de razas de *H. vastarix*; Alvarado-Alvarado et al. (2000) y Cerda et al. (2017), cuantificaron el efecto depresivo de la enfermedad sobre el rendimiento y finalmente, Alvarado-Huamán et al. (2020) y Borjas-Ventura et al. (2020) realizaron estudios epidemiológicos durante un ciclo productivo del café en el germoplasma de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación y características del campo experimental

La Colección de germoplasma de *C. arabica* del INIA se ubica en la Estación Experimental Agraria Pichanaki del INIA, en la provincia de Chanchamayo, región de Junín, coordenadas UTM son 513476 m E y 8792341 m S, a 774 m s.n.m. Temperatura media es 26.70 °C (máximo 32,62 °C; mínimo 20,74 °C), humedad relativa de 78 % y precipitación de 1589,60 mm. Fisiografía de colina alta, suelo presenta textura franca arcillosa limosa, pH de 4,49, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) de 5,11 meq/100g y saturación de aluminio con respecto a la CIC de 15,67 %. La colección fue establecida bajo un sistema agroforestal, la distribución de las accesiones fue de 2,5 x 1,0 m.

3.2. Diseño experimental y manejo de campo

La colección se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA) con 10 réplicas, del cual sólo se evaluaron las cinco plantas centrales. Con los datos fenotípicos obtenidos se realizó un ANOVA, considerando la variable respuesta cada variable evaluada. El modelo lineal se describió de la manera siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Dónde:

Y_{ij} : Observación del *i*-ésimo tratamiento en la *j*-ésima repetición.

μ : Media general

G_i : Efecto del *i*-ésimo genotipo

ε_{ij} : Efecto del error aleatorio dentro de la *i*-ésimo genotipo y *j*-ésimo variable

j : 1, 2, 3,.....r (variable)

i : 1, 2, 3,.....t (genotipo)

La conducción se realizó en base al paquete tecnológico propuesto por el Programa Nacional de café del INIA que consistió en aplicar a las plantas 250 ml de fungicida Tenaz® más 1 L de foliar trihormonal (auxinas, giberelinas y citoquininas) diluido en 200 L de agua, antes del inicio de la floración de cada campaña (junio y julio) con la finalidad de promover una rápida recuperación de las plantas. Asimismo, 461 g/planta del fertilizante YaraMila Tristar™ (15-15-15) más 2 kg/planta de materia orgánica (Sungro Horticulture) fue fraccionado y aplicado en tres dosis, en las fases fenológicas del llenado de grano, cosecha y floración del cultivo.

3.3. Material vegetal

La colección nacional de germoplasma de *C. arabica* del INIA mantiene un total de 169 accesiones del cultivo, obtenidas a partir de colectas realizadas en el año 2014 por el INIA y el KOPIA (Korea Project on International Agriculture) en los departamentos de Pasco, Junín, Huánuco, Ucayali, Cajamarca y Amazonas, principales corredores productivos del país.

Tabla 1. Departamento y número de accesiones colectadas en el Perú y conservadas en la Colección de germoplasma de *C. arabica* del INIA.

| Departamento | Nro. de accesiones | Códigos de accesiones |
|--------------|--------------------|---|
| Amazonas | 30 | 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - 24 - 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 |
| Cajamarca | 54 | 31 - 32 - 33 - 34 - 35 - 36 - 37 - 38 - 39 - 40 - 41 - 42 - 43 - 44 - 45 - 46 - 47 - 48 - 49 - 50 - 51 - 52 - 53 - 54 - 55 - 56 - 57 - 58 - 59 - 60 - 61 - 62 - 63 - 64 - 65 - 66 - 67 - 68 - 69 - 70 - 71 - 72 - 73 - 74 - 75 - 76 - 77 - 78 - 79 - 80 - 81 - 82 - 83 - 84 |
| Huánuco | 20 | 98 - 100 - 101 - 103 - 104 - 105 - 106 - 108 - 110 - 112 - 113 - 114 - 117 - 119 - 120 - 122 - 123 - 124 - 126 - 130 |
| Junín | 34 | 131 - 133 - 134 - 135 - 136 - 137 - 138 - 139 - 140 - 141 - 142 - 143 - 144 - 145 - 146 - 147 - 149 - 150 - 152 - 153 - 154 - 155 - 156 - 157 - 158 - 159 - 160 - 161 - 162 - 163 - 164 - 165 - 166 - 167 |
| Pasco | 25 | 168 - 169 - 171 - 172 - 173 - 174 - 183 - 199 - 200 - 203 - 205 - 212 - 213 - 214 - 216 - 218 - 219 - 220 - 222 - 226 - 228 - 229 - 230 - 232 - 233 |
| Ucayali | 6 | 236 - 237 - 242 - 245 - 248 - 249 |

3.4. Datos colectados

3.4.1. Variables evaluadas

Las características agro-morfológica se obtuvieron de la evaluación de 162 accesiones de café, cada una con 5 plantas y cuando alcanzaron los 6 años de desarrollo

vegetativo. Se evaluaron 19 caracteres cuantitativos y un carácter cualitativo, divididos en 10 descriptores agronómicos y 10 morfológicos, los cuales se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Descriptores utilizados para el estudio de la caracterización agro-morfológica de la Colección de germoplasma de *C. arabica* del INIA.

| Descriptor | Variable | Abreviatura |
|-------------------|---|-----------------------|
| Agronómico | Altura de planta | AP (m) |
| Morfológico | Diámetro de tallo | DT (cm) |
| Morfológico | Número de ramas por árbol | NRA |
| Morfológico | Número de ramas productivas | NRP |
| Morfológico | Longitud de rama productiva | LRP (cm) |
| Morfológico | Número de nudos por rama | NNR |
| Morfológico | Longitud de entrenudos | LEN (cm) |
| Morfológico | Longitud del entrenudo ortotrópico | LNO (cm) |
| Agronómico | Grado de inclinación de planta | GIP |
| Morfológico | Área foliar | AF (cm ²) |
| Morfológico | Diámetro geométrico de fruto | DGF (mm) |
| Agronómico | Peso de 100 frutos | PCF (g) |
| Agronómico | Producción de frutos por planta | PF (kg) |
| Morfológico | Diámetro geométrico de semilla | DGS (mm) |
| Agronómico | Porcentaje de frutos vanos | PFV (%) |
| Agronómico | Porcentaje de daño por broca | PDB (%) |
| Agronómico | Incidencia de roya amarilla | RAI (%) |
| Agronómico | Severidad de roya amarilla | RAS |
| Agronómico | Porcentaje de daño por minador de la hoja | PMH (%) |
| Agronómico | Porcentaje de defoliación de planta | PDP (%) |
| Agronómico | Índice de la enfermedad | ID (%) |
| Agronómico | Área bajo la curva de progreso de la enfermedad | ABCPE |

3.4.2. Medición de variables

La evaluación de los caracteres se realizó durante todo el ciclo productivo del 2020-2021, distribuidos en las fases fenológicas de floración, llenado de grano, cosecha y descanso. A continuación, se describe la metodología utilizada para la medición de cada variable:

a. Altura de planta (AP)

Se midió la altura del café utilizando una regleta graduada de 5 m, ubicándola pegado al tallo desde el nivel del suelo hasta el ápice de la planta. El valor obtenido se expresó en metros.

b. Diámetro del tallo (DT)

Se midió en el tallo del café a 5 cm del nivel del suelo, empleando un calibrador tipo “Vernier” graduado en milímetros.

c. Número de ramas por árbol (NRA)

Se contó el número total de ramas presentes por planta de cafeto.

d. Número de ramas productivas (NRP)

Se contabilizó en cada planta solamente las ramas en producción.

e. Longitud de ramas productivas (LRP)

Se registró tomando al azar cuatro ramas productivas del tercio medio de cada planta, luego se midió con una regleta graduada en centímetros.

f. Número de nudos por rama (NNR)

Fue medidos en cuatro ramas productivas, contando cada nudo, se utilizaron las mismas donde se midió la longitud (LRP).

g. Longitud de los entrenudos (LEN)

Para la obtención de esta variable, se dividió la LRP con el NNR.

h. Longitud del entrenudo ortotrópico (LNO).

Obtenida de la división de la AP y el número de nudos del eje ortotrópico.

i. Grado de inclinación de la planta (GIP)

Fue obtenido de acuerdo a una escala arbitraria donde: 1 = tallo vertical, 2 = tallo con inclinación ligera (< de 20°), 3 = tallo medianamente inclinado (20° a 45°), 4 = tallos muy inclinados (> a 45°).

j. Área foliar (AF)

Se extrajeron cuatro hojas del cuarto nudo de una rama ubicada en el tercio medio de la planta, luego en el laboratorio se midió el largo (L) y ancho (A) de la hoja y se multiplicó por la constante 0,68 (L x A x 0,68) (Adem, 2020).

k. Diámetro geométrico del fruto (DGF) y semilla (DGS)

Determinado como la raíz cubica del promedio del diámetro del largo por ancho por espesor de un total de 10 frutos y granos de café de cada genotipo (Tounekti et al., 2017).

l. Peso de 100 frutos (PCF)

Se peso 100 frutos fisiológicamente maduros y sanos de cada cosecha por cada accesión de café.

m. Peso de frutos por planta (PFP)

Se midió la producción de frutos por planta, correspondiente al acumulativo de las cosechas de las primeras 5 campañas (2017–2021). De esta manera que se reduce el efecto de la bianualidad de la producción de la planta, mejorando la precisión del análisis (Botelho et al., 2010).

n. Porcentaje de frutos vanos (PFV)

Calculada por el número de frutos flotantes de una muestra de 100 frutos fisiológicamente maduros y aparentemente sanos.

o. Porcentaje de daños por brocas (PDB)

Se registró el daño ocasionado por la presencia de broca del café (*Hypothenemus hampei*), expresado como el porcentaje de infestación evaluados en 300 frutos por planta (PDB).

p. Incidencia de roya amarilla (RAI)

Es la variable de mayor uso y aplicación para las mediciones de roya en el campo, cuantificado como el porcentaje de hojas afectadas en las ramas de los árboles del café. Se evaluó tres ramas productivas situadas en el estrato alto, medio y bajo de la copa de la planta y orientadas cada una hacia los puntos cardinales (Norte, Sur, Este y Oeste). Luego fueron identificadas con una cinta de colores que posteriormente se marcaron con plumón indeleble como rama 1, rama 2 y rama 3 (r1, r2, r3). De cada rama se evaluaron 10 nudos que contenga 10 pares de hojas fotosintéticamente activas (O. Cabezas, *comunicación personal*). La incidencia de la enfermedad se evaluó en cada rama productiva, contando y registrando el número total de hojas y el número de hojas con lesiones en esporulación, cualquiera que sea la cantidad de lesiones presentes en cada hoja. La variable se expresó como el promedio del porcentaje de incidencia de roya por genotipo, determinada por la relación entre el número de hojas enfermas (NHE) y el número de hojas presentes (NHPr) en la rama productiva en el momento de cada lectura. Las evaluaciones se realizaron cada 30 días durante

18 meses, comprendida entre los ciclos productivos del 2020 y 2021. A continuación, se describe la fórmula:

$$RAI = \frac{NHE}{NHPr} \times 100 \quad (2)$$

q. Severidad de roya amarilla (RAS)

La severidad fue estimada de acuerdo con la escala propuesta por (Sera et al., 2007a). Donde: 0 = hojas sanas, 1 = hojas con 1 a 5 lesiones cloróticas y porcentaje de daño en la rama varía de 1 a 9 %; 2 = hojas con 1 a 5 lesiones con esporulación, con presencia de daño en la rama entre el 1 a 9 %; 3 = hojas con 6 a 25 lesiones con esporulación con daño en la rama de 10 a 35 %; 4 = hojas con más de 25 lesiones con esporulación y daño en la rama por encima del 35 %. Las accesiones que presentaron índices de severidad entre 0 a 1 fueron considerados resistentes; 2, 3 y 4 fueron designados como susceptibles. Finalmente, la severidad fue cuantificada introduciendo los datos en la siguiente fórmula:

$$RAS = \frac{0(n)+1(n)+2(n)+3(n)+4(n)}{NHPr} \quad (3)$$

Donde:

De 0 a 4: Escala de severidad para roya amarilla del café.

n : Número de hojas infectadas en cada escala de daño.

$NHPr$: Número de hojas presentes al momento de la lectura.

r. Porcentaje de minador de la hoja (PMH)

Se valuó el número de hojas minadas con la plaga (NHM) de una rama que se ubicó en el estrato medio de la planta. Para la obtención de los promedios se utilizó la siguiente fórmula:

$$PMH = \frac{NHM}{NHPr} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

PMH : Número de hojas minadas.

$NHPr$: Número de hojas presentes al momento de la lectura.

s. Porcentaje defoliación de planta (PDP)

Se determinó basándose en la metodología propuesta por (Alvarado Alvarado y Solórzano Buitrago, 2001), que consistió en obtener el porcentaje de hojas caídas (PDP) por cada accesión, a partir del producto de la diferencia del potencial de hojas (NHPot) y el número de hojas presentes (NHPr) en las ramas al momento de cada evaluación, para esta medida se utilizaron las ramas marcadas evaluadas para la roya amarilla. El porcentaje de defoliación se estimó así:

$$\text{Número de hojas caídas (NHC)} = NHPot - NHPPr \quad (5)$$

$$PDP = \left(\frac{NHC}{NHPot} \right) * 100 \quad (6)$$

Donde:

NHC : Número de hojas caídas.

NHPot : Número de hojas potenciales.

NHPPr : Número de hojas presentes al momento de la lectura.

Finalmente, para los variables de PDB, RAI y PMH, los datos fueron transformados al arcoseno del porcentaje del daño ocasionado por la plaga o enfermedad ($\text{arsen}\sqrt{X}$).

3.5. Evaluación de la resistencia incompleta en campo

El valor de la severidad de cada genotipo fue transformado en Índice de la enfermedad (IE), siguiendo la fórmula propuesta por (McKinney, 1923):

$$IE (\%) = 100 \cdot \sum_{i=1}^n [(f \cdot v) / (n \cdot x)] \quad (7)$$

Donde:

f : Número de hojas enfermas para cada escala de severidad.

v : Corresponde a la escala observada (0, 1, 2, 3, 4).

n : Número de hojas evaluadas.

x : Máximo nivel de la escala utilizada.

Con estos valores obtenidos se graficó comportamiento de la epidemia de la enfermedad y se estimó el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE), para los ciclos productivos del 2019-2020 y 2020-2021. (Shaner y Finney, 1977) sugieren la utilización de la siguiente fórmula matemática para cuantificar la resistencia:

$$ABCPE = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{y_i + y_{i+1}}{2} \right) * (t_{i+1} - t_i) \right] \quad (8)$$

Donde:

y_i : Severidad de la enfermedad (basada en el índice de la enfermedad) en la i-ésima observación.

t : Tiempo en la i-ésima observación.

n : Número total de observaciones.

3.6. Evaluación de la resistencia incompleta en laboratorio

3.6.1. Material vegetal

Se evaluaron los genotipos identificados con resistencia completa/incompleta de la Colección de germoplasma de *C. arabica* del INIA, también se

utilizaron los cultivares de Catimor, Canéfora y Caturra como testigos resistentes y susceptibles (Tabla 3).

Tabla 3. Accesiones y cultivares de *C. arabica* utilizados en las pruebas de inoculaciones artificiales en laboratorio.

| Código de estudio | Tipo de material | Código de estudio | Tipo de material | Código de estudio | Tipo de material |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|---------------------|------------------|
| 16 | Accesión | 52 | Accesión | 205 | Accesión |
| 20 | Accesión | 53 | Accesión | Canf_1 | Canéfora |
| 26 | Accesión | 54 | Accesión | Canf_2 | Canéfora |
| 27 | Accesión | 62 | Accesión | Canf_a ¹ | Canéfora |
| 28 | Accesión | 63 | Accesión | Cat | Catimor |
| 29 | Accesión | 68 | Accesión | Catu_1 | Caturra |
| 32 | Accesión | 102 | Accesión | Catu_2 | Caturra |
| 37 | Accesión | 110 | Accesión | Catu_3 | Caturra |
| 38 | Accesión | 117 | Accesión | Catu_a ¹ | Caturra |
| 41 | Accesión | 134 | Accesión | H1 | Centroamericano |
| 46 | Accesión | 199 | Accesión | Mars | Marsellesa |
| 47 | Accesión | 203 | Accesión | | |

^{1/} Hojas de café inoculadas sólo con agua.

3.6.2. Colecta de uredosporas

La colecta de uredosporas de *H. vastatrix* se realizó en el Fundo El Naranjal, ubicado en el C. P. de Eneñas, Distrito Villa Rica, Provincia de Oxapampa, Región de Pasco, en una plantación de café Caturra de 6 años. La colecta de hojas se realizó durante las primeras horas de la mañana, escogiendo aquellas que presentaron lesiones con abundante esporulación y libre de otros patógenos, seguidamente el material fue acondicionado en una caja isotérmica de 15 L a (≈ 5 °C) para su traslado al laboratorio de Fitopatología de la Dirección de Biotecnología y Recursos Genéticos, INIA.

3.6.3. Multiplicación de uredosporas

Se utilizó el método de multiplicación de las uredosporas sugerido por Zambolim y Chaves (1974), Eskes (1982) y Júnior et al. (2015), con algunas modificaciones. Antes de iniciar las inoculaciones, las plantas del cultivar de caturra de 6 meses de edad fueron acondicionados en el laboratorio a 22 ± 2 °C y sometidos a un régimen de 48 horas de oscuridad. Luego, con un pincel pelo de camello N° 2 las pústulas de roya amarilla fueron raspadas de las hojas infectadas y depositadas en un vaso de precipitación conteniendo 100 mL agua destilada

estéril. Seguidamente, se homogenizó la suspensión durante 10 min utilizando un agitador de vidrio. A la suspensión obtenida se realizó diluciones hasta conseguir una concentración de 2.0 mg uredosporas/mL (Eskes, 1982; Júnior et al., 2015; Rozo et al., 2012; Toniutti et al., 2017; Valencia et al., 2017), el cual fue aplicado en la superficie inferior de las hojas utilizando un atomizador. Inmediatamente, en la base de cada macetero se colocó unos recipientes donde se depositó agua destilada estéril, de modo que favorezca la humedad. A cada planta se cubrió con una bolsa negra de polietileno (50 cm de largo x 40 cm de ancho) que fue sellada en la base del recipiente con una liga, simulando cámara oscura con HR superior al 90 %. En estas condiciones las plantas permanecieron durante 72 horas a 22 ± 2 °C. Transcurrido este periodo de tiempo, se retiraron las bolsas de las plantas y se mantuvieron a 22 ± 2 °C de temperatura, HR del 65 a 80 %, bajo condiciones de luz natural (500 a 1000 luxes) y con fotoperiodo de 12 horas luz y 12 horas oscuridad, durante 60 días, momento en el cual se recogieron las uredosporas en placas Petri esterilizadas para posteriormente utilizarse en las inoculaciones en hojas separadas de café.

3.6.4. Prueba de germinación

Para verificar la viabilidad de las uredosporas de *H. vastatrix*, se utilizó la prueba de germinación en medio agar-agua al 2 %, propuesto por Zambolim y Chaves (1974) con modificaciones. Antes de las inoculaciones en las hojas separadas de los genotipos seleccionados. En cada placa se aplicó y distribuyó 5 gotas de 200 μ L de una suspensión previamente preparada a una concentración del 0,5 mg de uredosporas/mL, con auxilio de una micropipeta, luego las placas fueron llevadas a incubación por 24 horas, en ausencia de luz y a 22 ± 2 °C. Al finalizar este periodo, utilizando una micropipeta se separó 5 μ L de la suspensión en agar y se depositaron en la cámara de Neubauer, luego ésta fue llevada al microscopio a fin de calcular el porcentaje de germinación (G); que fue definido como el conteo del número de esporas germinadas en un total de 200 esporas contadas (Rozo et al., 2012). Finalmente, se utilizaron para las inoculaciones en hojas separadas uredosporas con viabilidad superior al 30 % de germinación (Cabral et al., 2009; Capucho et al., 2005, 2007, 2009)

3.6.5. Colecta y preparación de las hojas

Las hojas fueron colectadas a primeras horas del día, ente las 6 y 8 a.m., seleccionando tres hojas jóvenes y bien desarrolladas, localizadas en el tercer o cuarto nudo de una rama ubicada en el tercio medio de la planta, aquellas que era visible su buen estado sanitario y sin daño mecánico. Preferentemente se eligieron las hojas formadas durante la etapa del estaquillado y la floración del café (etapa vegetativa) (Eskes, 1982). Inmediatamente, las

hojas fueron colocaron en sobres de papel Kraft y transportados al laboratorio de Fitopatología de la EEA Pichanaki. En cuanto al testigo resistente y susceptible, el material se obtuvo de la penúltima y antepenúltima par de hojas de plantas de 6 meses de edad, criados en condiciones de casa malla en maceteros de 3 L de capacidad, utilizando suelo y materia orgánica en proporción 2:1. Antes de las inoculaciones, las hojas fueron lavadas con agua de caño tres veces y secadas cuidadosamente en papel toalla. Las hojas se colocaron con la cara abaxial encima de la espuma laminada saturada de agua, contenida en el interior de una caja de poliestireno (20 cm x 14 cm x 4.0 cm). Finalmente, las cajas se cerraron y se mantuvieron en la incubadora a 22 ± 2 °C por 24 horas.

3.6.6. Inoculación y evaluación de los componentes de la resistencia

Las hojas fueron inoculadas mediante el método de inoculaciones en hojas separadas propuesto por Capucho et al. (2005) y usando una suspensión de 0,5 mg de uredosporas/mL (Eskes, 1982, 1983; Rozo et al., 2012; Toniutti et al., 2017; Valencia et al., 2017). Para la obtención de la suspensión, se colectó las uredosporas de *H. vastatrix* de las hojas de plantas de la variedad Caturra con abundante esporulación. Con auxilio de un pincel pelo de camello N° 2 se frotó suavemente la superficie infectada de las hojas depositando 25 mg de esporas en tubos de eppendorf. El inóculo se preparó en un vaso de precipitación conteniendo 250 mL agua destilada estéril y adicionando 125 mg de uredosporas, el cual fue homogenizado manualmente con apoyo de una varilla de vidrio, durante 30 minutos. Seguidamente, con una micropipeta se aplicó 10 gotas de 10 µL de la suspensión sobre la superficie inferior y entre las costillas del limbo. Durante el proceso, la suspensión fue constantemente homogenizado, inmediatamente después de cada hoja inoculada. Luego, las cajas con las hojas inoculadas fueron cerradas y colocadas en incubación por 48 horas a 22 ± 2 °C en ausencia de luz. Pasado este periodo de tiempo, las hojas se limpiaron utilizando una mota de algodón húmedo que se frotó cuidadosamente entre las zonas inoculadas, a fin de evitar contaminaciones por hongos que parasitan a *H. vastatrix*. Finalmente, cajas fueron mantenidas en fotoperiodo de 12 horas luz y 12 h de oscuridad, a 22 ± 2 °C y regulando la luz en el laboratorio a 500 a 1000 luxes. Se realizaron ocho evaluaciones durante una periodicidad de 60 días, registrándose los siguientes componentes de la resistencia incompleta:

a. Periodo de incubación (PI)

Definido como el intervalo de tiempo que transcurre entre la inoculación y la aparición del primer síntoma de la enfermedad. Esta variable fue cuantificada hasta que el 50 % de los sitios inoculados presentaron síntomas de la enfermedad (Capucho et al. 2005).

b. Periodo de latencia (PL)

Es el intervalo de tiempo que transcurre entre la inoculación y el 50 % de sitios inoculados que presentaron lesiones con uredias esporuladas (Capucho et al. 2005).

c. Número de lesiones (NL)

Cuantificada mediante el número de sitios inoculados que presentaron lesiones esporuladas y no esporuladas (Capucho et al. 2005).

d. Número de lesiones esporuladas (NLE)

Corresponde al número de sitios inoculados con lesiones con uredias esporuladas por hoja, independientemente del grado de reacción (Barbosa et al., 2019).

e. Frecuencia de infección (FI)

Se obtuvo dividiendo el número de sitios inoculados con lesiones por el número total de gotas aplicadas a cada hoja (Capucho et al. 2005).

f. Escala de caracterización de la reacción

Se registrará cada 7 días el progreso de la enfermedad, teniendo en cuenta cada gota como cada sitio, y registrando de forma individual en el tiempo, es muy probable que se evalúe hasta cuando el control llegué a su mayor grado de expresión de la enfermedad, pudiendo ser 4 a 6 evaluaciones.

Tabla 4. Índice de esporulación para la caracterización de la resistencia de accesiones de *C. arabica* frente a *H. vastatrix* (Tamayo et al., 1995).

| Grado | Descripción |
|-------|--|
| 0 | Ausencia de síntomas |
| 1 | Manchas cloróticas pequeñas (hasta 1 mm de diámetro), ausencia de esporulación. Reacción de Hipersensibilidad. |
| 2 | Manchas cloróticas medianas (1 - 3 mm de diámetro), ausencia de esporulación en las uredias. |
| 3 | Manchas cloróticas medianas (1 - 3 mm de diámetro), poco uredosporas, menos del 25 % de uredias esporuladas. |
| 4 | Manchas cloróticas grandes (mayor a 3 mm de diámetro), presencia nítida de uredosporas, 25 a 50 % de uredias esporuladas |
| 5 | Manchas cloróticas grandes (mayor que 3 mm de diámetro). Uredosporas abundante, más del 50 % de uredias esporuladas |

3.7. Análisis estadístico

3.7.1. Caracterización agro-morfológica y diversidad fenotípica

Los análisis descriptivos se realizaron con todas las características evaluadas. Un análisis de varianza (ANOVA) fue realizado para verificar diferencias

significativas entre las variables de acuerdo con un diseño completamente aleatorizado. Posteriormente, con los componentes de la varianza se calculó los estadísticos descriptivos (promedio, desviación estándar, mínimos, máximos) y parámetros genéticos con la finalidad de determinar la variabilidad morfológica presente en la colección de germoplasma. El coeficiente de variación genotípica (GCV), coeficiente de variación fenotípica (PCV), coeficiente de variación ambiental (ECV), índice de variación (IV) y la heredabilidad (H) fueron estimados basado en las fórmulas sugeridas por Singh (1981); Falconer y Mackay (2009):

$$\text{Coeficiente de variación genotípica (GCV)} = \frac{100\sqrt{\hat{\phi}_g}}{\hat{\mu}} \quad (9)$$

$$\text{Coeficiente de variación fenotípica (PCV)} = \frac{100\sqrt{QMG}}{\hat{\mu}} \quad (10)$$

$$\text{Coeficiente de variación ambiental (ECV)} = \frac{100\sqrt{QMR}}{\hat{\mu}} \quad (11)$$

$$\text{Índice de variación (VI)} = \frac{GCV}{ECV} \quad (12)$$

$$\text{Heredabilidad en sentido amplio (H)} = \frac{\sigma^2_g}{\sigma^2_p} \quad (13)$$

Donde:

$$\text{Variabilidad genotípica } (\hat{\phi}_g): \frac{QMG-QMR}{r}$$

QMG : Cuadrado medio de la accesión.

QMR : Cuadrado medio del residuo.

σ^2_g : Varianza genotípica.

σ^2_p : Varianza fenotípica.

$\hat{\mu}$: El promedio de los caracteres morfológicos.

r : Número de repeticiones.

Para el análisis de las asociaciones entre las variables se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r) con una probabilidad del 5 % ($P \leq 0.05$) Las correlaciones fenotípicas y genotípicas fueron realizadas en base a las fórmulas propuestas por (Cruz, 2013):

$$\text{Correlación fenotípica (rp)} = \frac{\hat{\phi}_{p_{xy}}}{\sqrt{\hat{\phi}_{p_x}\hat{\phi}_{p_y}}} \quad (14)$$

Donde:

$\hat{\phi}_{p_{xy}}$: Covarianza fenotípica entre los caracteres x e y .

$\hat{\phi}_{p_x}$: Varianza fenotípica del carácter x ;

$\hat{\phi}p_y$: Varianza fenotípica del carácter y .

$$\text{Correlación genotípica } (rg) = \frac{\hat{\phi}g_{xy}}{\sqrt{\hat{\phi}g_x \hat{\phi}g_y}} \quad (15)$$

Donde:

$\hat{\phi}g_{xy}$: Covarianza genotípica entre los caracteres x e y .

$\hat{\phi}g_x$: Covarianza genotípica del carácter x ;

$\hat{\phi}g_y$: Covarianza genotípica del carácter y .

La divergencia genética fue determinada en base a 19 caracteres cuantitativos, mediante la estimación de la distancia generalizada de Mahalanobis, para la cual, se utilizó la siguiente ecuación (Cruz y Souza Carneiro, 2006; Mahalanobis, 1936):

$$D^2p = (X_i - X_j)S^{-1}(X_i - X_j) \quad (16)$$

Donde:

D^2p : La distancia generalizada total para p caracteres.

X_i y X_j : Son los p promedios para los vectores de los genotipos i y j .

S^{-1} : Es la inversa de la matriz de covarianza.

Luego, las medias de disimilaridad fueron utilizadas para la formación de grupos mediante el método de Optimización de Tocher. Para facilitar el análisis, solamente los grupos con gran número de accesiones fueron subdivididos, siguiendo el procedimiento anterior. Finalmente, un análisis de componentes principales (ACP) fue realizado a fin de evaluar e identificar las accesiones más diversas, que reúnan caracteres útiles para la mejora simultánea o independiente del cultivo de café. Adicionalmente, mediante la obtención de la matriz de autovectores para cada componente principal (CP), se generó un gráfico bidimensional que ilustra de manera explicativa la variabilidad identificada. Todos estos análisis fueron desarrollados en el Software GENES (Cruz, 2013).

3.7.2. Determinación de genotipos resistencia en campo

Con las variables IE y ABCPE se determinó el grado de resistencia/susceptibilidad de los genotipos de café; utilizando el paquete estadístico “mclust” versión 5.0 (Scrucca et al., 2016). El mclust, es un paquete de R para el modelado de mezclas gaussianas (distribución gaussiana) a través del algoritmo EM, agrupamiento basado en modelos, clasificación y estimación de densidad (Scrucca et al., 2016).

3.7.3. Análisis de los componentes de la resistencia

Las observaciones fueron sometidas a análisis de varianza de manera individual, luego con las siete variables se realizó un análisis multivariado en el Software GENES (Cruz, 2013), el cual mediante las técnicas jerárquica utilizando la distancia Euclidiana estandarizada media y Ward se formaron los grupos de resistencia a *H. vastatrix*.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de varianza

El ANOVA para cada una de las variables agromorfológicas reveló diferencias altamente significativas ($P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$) entre todas las accesiones estudiadas (Tabla 5). Estos resultados respaldan la hipótesis de existencia de gran variabilidad fenotípica en la colección de germoplasma del INIA, sobre todo, para los caracteres que están asociados a la producción y sanidad del café.

Tabla 5. Resumen del ANOVA, considerando los resultados de los cuadrados medios obtenidos para 20 variables agromorfológicas evaluadas en 162 accesiones de *C. arabica* de la colección de germoplasma del INIA, Pichanaki.

| Cuadrados medios | | | | | |
|-------------------------|----------|----|--------|------------------------|--------|
| Caracteres morfológicos | | | | Caracteres agronómicos | |
| Fuente de variación | Accesión | | Error | Fuente de variación | Error |
| GL | 161 | | 648 | GL | 648 |
| DT | 2,98 | ** | 0,46 | AP | 0,07 |
| NRA | 738,92 | ** | 126,51 | GIP | 0,46 |
| NRP | 847,04 | ** | 199,36 | PCF | 1,74 |
| LRP | 629,36 | ** | 129,74 | PFP | 0,08 |
| NNR | 36,96 | ** | 8,87 | PFV | 12,26 |
| LEN | 5,66 | ** | 0,76 | PDB | 26,73 |
| LNO | 22,76 | ** | 1,39 | RAI | 148,89 |
| AF | 3091,08 | ** | 404,14 | RAS | 0,31 |
| DGF | 5,10 | ** | 0,85 | PMH | 129,59 |
| DGS | 3650,11 | ** | 303,28 | PDP | 129,59 |

Grados de libertad (GL). Significancia al 5 % (*). Significancia al 1 % (**). Altura de planta (AP). Diámetro del tallo (DT). Número de ramas por árbol (NRA). Número de ramas productivas (NRP). Longitud de ramas productiva (LRP). Número de nudos por rama (NNR). Longitud de los entrenudos (LEN). Longitud del internudo ortotrópico (LNO). Grado de inclinación de la planta (GIP). Área foliar (AF). Diámetro geométrico del fruto (DGF). Diámetro geométrico de la semilla (DGS). Peso de 100 frutos (PCF). Producción de frutos por planta (PFP). Porcentaje de frutos vanos (PFV). Porcentaje de daño por broca del café (PDB). Incidencia de roya amarilla (RAI). Severidad de roya amarilla (RAS). Porcentaje de infestación de Minador de la hoja del café (PMH). Porcentaje de defoliación de la planta (PDP).

La variabilidad observada en este estudio, favorecen la efectividad de la selección para el mejoramiento genético de las características de interés agronómico a través de hibridaciones entre genotipos de buen desempeño en campo. Además, Olika et al. (2011) y Hedrick, (2009) mencionan que la prevalencia de tal variabilidad en una especie autógena

como *C. arabica* es de suma importancia y que puede atribuirse a tendencias evolutivas o a mutaciones naturales que ocurren dentro de la población. En general, investigaciones anteriores han reportado resultados similares a los observados en este trabajo, determinando alta diversidad genética en accesiones de café a través del estudio de caracteres cuantitativos y cualitativos (Adem et al., 2020; Alemayehu, 2019; Atinafu y Mohammed, 2017b; Beksisa et al., 2017; Tounekti et al., 2017; WeldeMichael et al., 2013; Weldemichael et al., 2017).

4.2. Estadística descriptiva y parámetros genéticos

4.2.1. Estadística descriptiva

En la Tabla 6 se presenta el patrón de respuestas encontradas. La AP obtuvo una promedio y desviación estándar de $2,47 \pm 0,47$ m y el rango fluctuó entre 1,54 a 3,71 m; el DT varió entre 3,02 a 7,11 cm; el NRA osciló de 34,80 a 116,80; la LNO presentó valores entre 4,01 a 13,88 cm y el GIP fue de 1 a 3,60. Estas variables determinan el tipo de crecimiento del café y establece la prevalencia de accesiones de porte bajo y alto, que vendrían a ser derivados de los grupos genéticos de típica, bourbon e híbridos (Anthony et al., 2002). Además, Aguiar et al. (2004) argumenta que, las plantas que presentan menor crecimiento generalmente son más compactas y productivas, en cuanto a los de mayor crecimiento, incluso, pueden ser utilizados como un criterio de selección para programas de mejoramiento genético, ya que, se relaciona con el potencial productivo. Lo mencionado, concuerda con los hallazgos en este estudio, por ejemplo, la accesión 37 se caracterizó por ser compacta y de tallo rígido y entrenudos ortotrópicos cortos, presentando 1,54 m de AP, 82,4 de NRA y 5,37 kg de PFP. Mientras que, la accesión 9 de aspecto no compacto, tallo principal muy flexible y entrenudos ortotrópicos distantes, registró un AP de 3,58 m, NRA de 54 y PFP de 2,06 kg. En cuanto a los caracteres relacionados con el NRP resalta por su importancia en el potencial productivo de la planta, puesto que, es la encargada de mantener la estabilidad de la producción en los años siguientes después de haberse iniciado la primera cosecha. El NRP, se relaciona con la LRP, NNR y la LEN, y éstas a su vez con las variables de AP, NRA y LNO, determinando de forma conjunta el arqueotipo y desempeño de la planta. Nuestros resultados indican que, el NRP obtuvo un rango de 18,40 a 83,20, con un promedio de 45,08; la LRP varió entre 44,20 a 102,60 cm, con un promedio de 67,12 cm; el NNR fue de 7,40 a 23,60, con un promedio de 14,09 y la LEN fluctuó entre 3,10 a 9,70 cm, con un promedio de 4,09 cm. Las variaciones encontradas en los caracteres cuantitativos LRP, NNR y LEN concuerdan con lo reportado por Adem et al. (2020), Beksisa et al. (2021); Atinafu y Mohammed (2017b) y Weldemichael et al. (2017) en estudios de diversidad para accesiones de café en Etiopía.

Tabla 6. Parámetros descriptivos y de variación genética para 20 características agromorfológicas evaluadas en 162 accesiones de café de la colección de germoplasma del INIA, Pichanaki.

| Variables | Prom ± | DE | Min | Max | GCV% | PCV% | ECV% | H% | IV |
|-----------------------|---------------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| AP (m) | 2,47 ± | 0,47 | 1,54 | 3,71 | 18,35 | 18,94 | 10,55 | 93,80 | 1,74 |
| DT (cm) | 4,89 ± | 0,77 | 3,02 | 7,11 | 14,49 | 15,77 | 13,87 | 84,53 | 1,00 |
| NRA | 60,98 ± | 12,16 | 34,80 | 116,80 | 18,15 | 19,94 | 18,45 | 82,88 | 0,98 |
| NRP | 45,08 ± | 13,02 | 18,40 | 83,20 | 25,25 | 28,87 | 31,32 | 76,46 | 0,81 |
| LRP (cm) | 67,12 ± | 11,22 | 44,20 | 102,60 | 14,89 | 16,72 | 16,97 | 79,39 | 0,88 |
| NNR | 14,09 ± | 2,72 | 7,40 | 23,60 | 16,83 | 19,30 | 21,14 | 76,00 | 0,80 |
| LEN (cm) | 4,96 ± | 1,06 | 3,10 | 9,70 | 19,95 | 21,44 | 17,56 | 86,58 | 1,14 |
| LNO (cm) | 8,51 ± | 2,13 | 4,01 | 13,88 | 24,28 | 25,06 | 13,85 | 93,89 | 1,75 |
| GIP | 1,73 ± | 0,59 | 1,00 | 3,60 | 29,16 | 34,01 | 39,16 | 73,49 | 0,74 |
| AF (cm ²) | 100,67 ± | 24,86 | 42,92 | 251,23 | 23,03 | 24,70 | 19,97 | 86,93 | 1,15 |
| DGF (mm) | 13,25 ± | 1,01 | 11,59 | 18,43 | 6,94 | 7,62 | 6,94 | 83,41 | 1,00 |
| PCF (g) | 172,61 ± | 27,02 | 98,53 | 274,87 | 14,99 | 15,65 | 10,09 | 91,69 | 1,49 |
| PFP (kg) | 3,26 ± | 1,64 | 0,25 | 8,52 | 47,12 | 50,46 | 40,46 | 87,14 | 1,16 |
| DGS (mm) | 7,90 ± | 0,55 | 6,73 | 9,92 | 6,78 | 6,96 | 3,53 | 94,86 | 1,92 |
| PFV (%) | 5,98 ± | 3,68 | 1,40 | 23,20 | 55,70 | 61,55 | 58,57 | 81,89 | 0,95 |
| PDB (%) | 19,48 ± | 6,02 | 4,84 | 36,29 | 28,56 | 30,92 | 26,54 | 85,27 | 1,08 |
| RAI (%) | 67,22 ± | 26,48 | 0,00 | 90,00 | 38,55 | 39,40 | 18,15 | 95,75 | 2,12 |
| RAS | 2,15 ± | 1,38 | 0,00 | 4,00 | 63,05 | 64,10 | 26,01 | 96,71 | 2,42 |
| PMH (%) | 49,24 ± | 9,39 | 25,77 | 77,68 | 16,57 | 19,08 | 21,13 | 75,46 | 0,78 |
| PDP (%) | 39,80 ± | 16,50 | 5,17 | 74,83 | 39,44 | 41,46 | 28,60 | 90,48 | 1,38 |

Promedio (Prom). Desviación estándar (DE). Máximo (Max). Mínimo (Min). Coeficiente de variación genotípica (GCV). Coeficiente de variación fenotípica (PCV). Coeficiente de variación ambiental (ECV). Índice de variación (IV) y la Heredabilidad (H). Altura de planta (AP). Diámetro del tallo (DT). Número de ramas por árbol (NRA). Número de ramas productivas (NRP). Longitud de ramas productiva (LRP). Número de nudos por rama (NNR). Longitud de los entrenudos (LEN). Longitud del internudo ortotrópico (LNO). Grado de inclinación de la planta (GIP). Área foliar (AF). Diámetro geométrico del fruto (DGF). Diámetro geométrico de la semilla (DGS). Peso de 100 frutos (PCF). Producción de frutos por planta (PFP). Porcentaje de frutos vanos (PFV). Porcentaje de daño por broca del café (PDB). Incidencia de roya amarilla (RAI). Severidad de roya amarilla (RAS). Porcentaje de infestación de Minador de la hoja del café (PMH). Porcentaje de defoliación de la planta (PDP).

Asimismo, la gran amplitud de estas variables puede ser observada en los rangos mostrados por las accesiones 72 y 112, los cuales, presentaron promedios de 66,00 NRP, 23,60 NNR, 3,10 cm para la LEN y 21,60 NRP, 7,40 NNR, 9,70 cm de LEN, respectivamente. De hecho, las diferencias también se notaron a nivel productivo, donde la accesión 72 obtuvo 3,81 kg y la accesión 112 apenas alcanzó 0,70 kg de PFP en cinco campañas cosechadas. Por tanto, las variables NNR y LEN han sido muy utilizados por mejoradores y productores de café, a fin de diferenciar una variedad muy productiva de otra no productiva, de ahí que, a mayor NNR y menor LEN, mayor será el potencial del nudo productivo, estructura donde se diferencia los

botones florales que dan lugar al desarrollo de los frutos. Estas observaciones generan la posibilidad de usar este criterio como base fiable para la identificación preliminar de genotipos con caracteres de alta productividad, además, responde a una frecuencia considerable de casos que se dieron en este estudio, donde las accesiones se caracterizaron por ser plantas de porte bajo con muchas ramas productivas, entrenudos cortos y muy productivos, con destaque de las accesiones 20, 26, 38, 46, 53, 54, 67 y 71.

El carácter de la hoja fue evaluado mediante estimaciones del AF y PDP, éstas a su vez, pueden ser utilizados como un indicador productivo en la evaluación de genotipos, debido a su contribución en la tasa de crecimiento y desarrollo vegetativo, eficiencia fotosintética, evapotranspiración y el uso de nutrientes y agua (Favarin et al., 2002; Unigarro et al., 2017). La accesión 6 obtuvo la menor AF que constó de 42,92 cm², mientras que la accesión 172 registró la mayor AF que estuvo en 251,23 cm². Por otro lado, la accesión 46 y 229 registraron las mínimas y máximas defoliaciones que bordearon entre 5,17 y 74,83 %, respectivamente. Sin embargo, entre las comparaciones realizadas, la accesión 46 que presentó una mayor productividad (8,52 kg), seguido de las accesiones 172 (4,90 kg), 229 (3,35 kg) y 6 (1,14 kg), estos resultados indicarían que, si un genotipo mantiene por mucho tiempo un AF activa y un número considerable de hojas, ésta será potencialmente más productivo, considerándose un genotipo promisorio.

Para los caracteres de fruto y semillas se observaron amplios rangos de valores mínimos y máximos, determinando para el DGF y DGS promedios de 13,25 y 7,90 mm, respectivamente. Para la variable DGF, el 58,64 % de las accesiones estimaron valores entre 18,43 a 13 mm, valores que estarían por encima de lo reportado para cultivares de café catuaí ($\emptyset = 13$ mm), costa rica 95 ($\emptyset = 14$ mm) y pacamara ($\emptyset = 15$ mm). En cuanto al DGS, las accesiones que sobresalen significativamente son 168, 163 y 158, los cuales, obtuvieron promedios de 9,92; 9,76 y 9,65 mm, respectivamente. Los resultados del DGS sugieren que, un gran número de accesiones presentarían granos comercialmente exportables, pues, bordea diámetros superiores a los tamices o cribas de 17/64" ($\emptyset = 6,75$ mm) y 16/64" ($\emptyset = 6,35$ mm). Las variaciones del DGF y DGS establecen la posibilidad de seleccionar accesiones para desarrollar la mejora del carácter del tamaño del grano, y a su vez, el rendimiento físico y la calidad de taza de la bebida.

Los caracteres de producción y de resistencia a roya amarilla (*H. vastatrix*) son rasgos muy deseados en el proceso de selección, el cual, permitirá a un genotipo avanzar para futuros estudios en un programa de mejoramiento genético, además de ello, se debe sumar otros rasgos de interés agronómico como porte bajo de planta, porcentaje de frutos vanos por

debajo del 5 %, alto porcentaje de granos de tipo comercial y un área foliar activa que se mantenga por mucho tiempo. De manera que, las accesiones 46, 53, 54, 38, 26, 71, 24, 67, 20, 27, 159 y 29 son las que sobresalen para la variable PFP, donde se estimaron promedios de 8,52 a 5,90 kg de café cerezo en cinco campañas cosechadas. Asimismo, las accesiones 53 y 46 presentaron valores de 9,96 y 10,83 % para RAI y 0,06 para la variable RAS. En cuanto a las demás accesiones, éstas mostraron altos valores de RAI pero con una baja RAS. Complementariamente a los variables de productividad y resistencia, las accesiones presentaron promedios aceptables de PFV, sin embargo, las accesiones 29 y 71 obtuvieron grandes pérdidas de grano, estando en 10,33 y 17,93 %, respectivamente. Cabe destacar que, si se realiza la estimación de la producción por año en cálculos del valor café pergamino seco por hectárea, las accesiones mencionadas lograrían posicionarse con valores por encima del promedio nacional, según lo reportado para la campaña 2019 – 2020 de 752 kg/ha por la USDA (USDA, 2020).

Las variables relacionadas con el estado fitosanitario de las accesiones presentaron valores mínimos y máximos extremos, mostrando posibles fuentes de resistencia. Los daños ocasionados por broca del café (*Hypothenemus hampei*) y minador de la hoja (*Perileucoptera coffeella*), obtuvieron niveles de infestación que no llegaron a ser mayores al 40 y 80 %, respectivamente. Sin embargo, aunque al evaluar difícilmente se encontraron plantas completamente sanas, los resultados ofrecen la posibilidad de identificar genotipos con menor grado infestación, que podrían adaptarse a ecosistemas agrícolas de zonas bajas que presentan bruscos cambios en sus patrones de temperatura y precipitación, condiciones propicias para el desarrollo de las plagas. Finalmente, el uso de genotipos con cierto grado de resistencia podría formar parte de paquetes tecnológicos en programas de manejo integrado de plagas que se enfoquen en aumentar la productividad, disminuir el uso de insecticidas y preservar el medio ambiente.

4.2.2. Parámetros genéticos

Estudiar la diversidad dentro de un germoplasma a través de los coeficientes de variación genotípico (GCV), coeficientes de variación fenotípico (PCV), coeficientes de variación ambiental (ECV), coeficiente de heredabilidad (H) e índice de variación (IV), permiten conocer la naturaleza y magnitud de la acción genética en la herencia para un carácter en particular, por lo tanto, posibilita la selección simultánea de un mayor número de caracteres que sirvan como propósito para dirigir la selección hacia genotipos superiores (Ivoglio et al., 2008; Paw et al., 2020). Los parámetros de variación encontrados en este estudio se muestran en la Tabla 6. Las magnitudes obtenidas para el GCV y PCV fueron categorizados como bajo (0 – 10 %), moderado (10 – 20 %) y alto (mayor a 20 %) según lo

propuesto por Deshmuk et al. (1986). Con relación a las categorías descritas, las variables que presentaron altas magnitudes de GCV y PCV fueron, el NRP, LNO, GIP, AF, PFP, PFV, DBC, RAI, RAS, PMH y PDP. En tanto, el LEN obtuvo una magnitud que varió de moderado a alto para el GCV y PCV, respectivamente. En cambio, el DGF y DGS se clasificaron con magnitud baja para los GCV y PCV. En cuanto al resto de variables mostraron magnitudes moderadas. Asimismo, se observó que el PCV fue ligeramente mayor al GCV, indicando que los caracteres están menos influenciados por el ambiente, es decir, el genotipo jugó un mayor rol en la expresión del carácter. Resultados semejantes ya fueron reportados en otros análisis de genotipos de café (Alemayehu, 2019; Atinafu et al., 2017; Cheserek et al., 2020; Merga et al., 2021; Weldemichael et al., 2017). El coeficiente de heredabilidad (H), es considerado como el ratio del GCV y PCV, pudiendo reportarse de 0 a 100 %, donde los valores mayores a 80 %, aseguran la ganancia genética de selección (Falconer y Mackay, 2009; Ferrão et al., 2008). El índice de variación (IV) representa la relación entre el GCV y PCV, pues, determina si la variabilidad se debe a causas genéticas o ambientales. Cuando este valor es cercano a 1, se considera que la variación es predominantemente causada por el genotipo. Para este estudio, se considera que las variables LEN, AF, PFP, DGS, DBC, RAI, RAS y PDP, son rasgos de interés agronómicos, debido a que presentan valores de IV mayor a 1, y una H superior al 80 %. Por lo tanto, estas variables se deben considerar de interés para el programa de mejoramiento genético del café en la colección de germoplasma del INIA porque probablemente sean caracteres transmitidos de una generación a otra (Dutra Giles et al., 2019; Ivoglo et al., 2008; Paw et al., 2020).

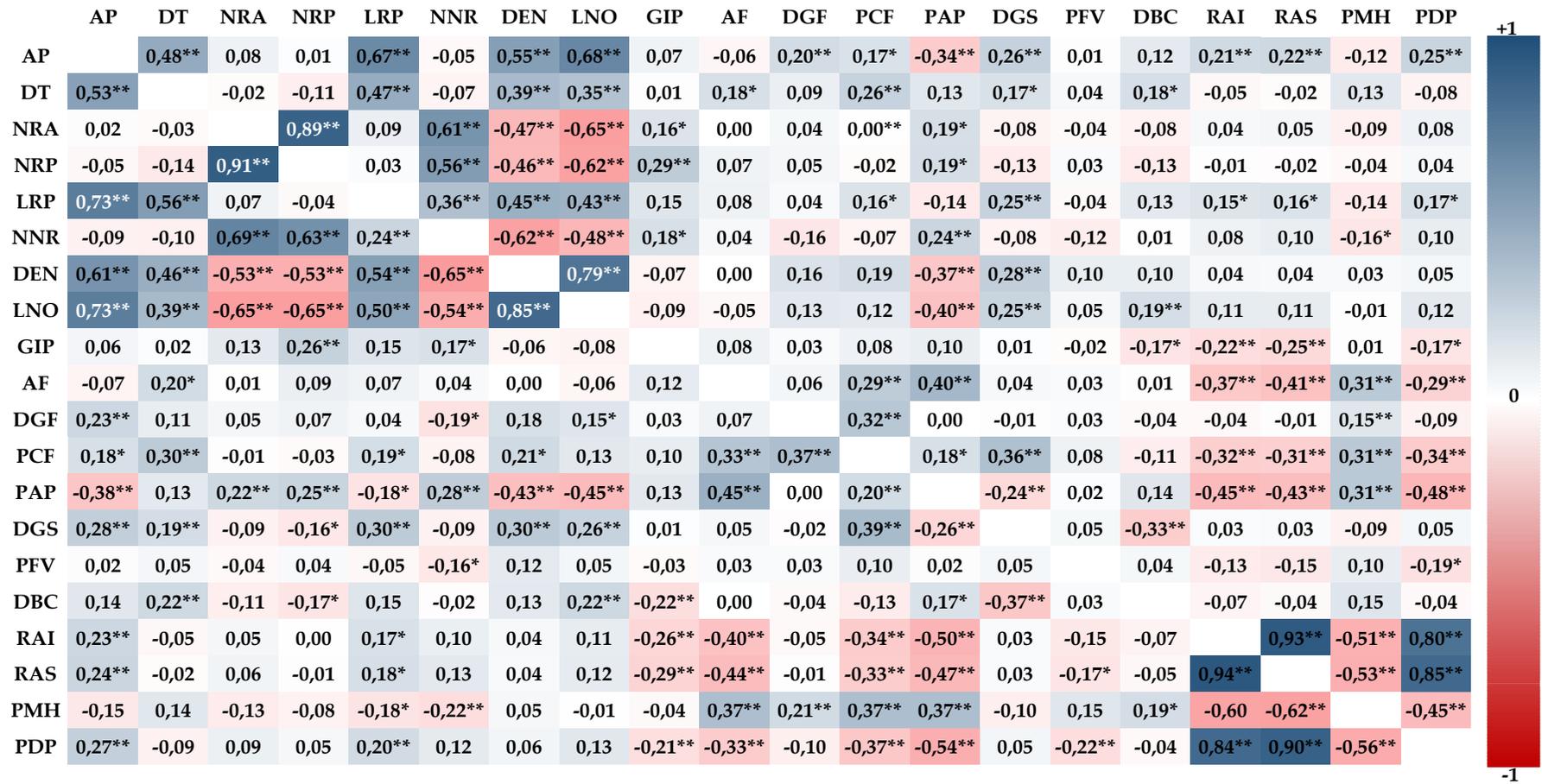
4.3. Coeficiente de correlación entre las variables agromorfológicas

El análisis de los coeficientes de correlación fenotípica y genotípica para las 20 variables agromorfológicas mostraron asociaciones positivas y negativas para un nivel de significancia del 5 y 1 %, respectivamente (Figura 3). Con algunas excepciones, la magnitud de asociación entre las variables fue mayor para el coeficiente de correlación genotípica comparado al valor mostrado por el coeficiente de correlación fenotípica. Además, se detectó un mayor número de asociaciones significativas para las correlaciones genotípicas. Esto permite inferir que la magnitud de asociación entre los caracteres se debe fundamentalmente, a propiedades genéticas del material, por lo tanto, son causados por efectos pleiotrópicos de los genes o por ligación genética (Falconer y Mackay, 2009).

En cuanto al rendimiento del café, se observó que la correlación fenotípica y genotípica para la variable PFP mostró ser significativa y positiva con las variables NRA, NRP, NNR, AF, PCF, DBC y PHM. Similarmente, la PFP se correlacionó de manera

significativa y negativa con las variables AP, LEN, LNO, DGS, RAI, RAS y PDP, tanto a nivel fenotípico y genotípico. A priori, estos resultados indicarían que el incremento del rendimiento podría ser obtenido a través del mejoramiento y la selección simultánea de las variables mencionadas. Además, Cerda et al. (2017) y Unigarro et al. (2017) indican que el número de nudos productivos, número de ramas plagiotrópicas y área foliar se asocia directamente con el potencial productivo de la planta y que estas deben considerarse como componentes de la productividad. Interesantemente, las correlaciones de la variable PFP entre AP, LEN, LNO, DGS, RAI, RAS y PDP, indican la existencia de accesiones con resistencia a roya amarilla que estarían caracterizadas por ser plantas de porte bajo y compacto, rasgos idóneos que conllevarían a adoptar las estrategias necesarias para establecer un programa de mejoramiento genético del café a través del aumento del número de plantas por superficie de área en los diversos sistemas agrícolas del país. Por otro lado, el mejorador debe tener especial cuidado si pretende mejorar el DGS a través del peso o volumen, ya que, por asociarse negativamente con el PFP, podría conllevar a una ganancia en el peso o volumen de la semilla, pero con pérdida del rendimiento debido a la obtención de un menor número de ramas plagiotrópicas en la expresión del fenotipo. Por lo tanto, en caso de variables correlacionadas negativamente, es necesario una selección independiente, el cual, podría conducir a la mejora del carácter deseado. Las observaciones de este estudio concuerdan con los reportes de WeldeMichael (2019), Kifle et al. (2018), Atinafu et al. (2017) y Olika et al. (2011), quienes encontraron que la relación entre el rendimiento de café y sus componentes de la producción suelen expresarse con magnitudes positivas y significativas.

En cuanto a la variable RAS mostró una asociación significativa y positiva con las variables AP, LRP, RAI y PDP para las correlaciones fenotípicas y genotípicas, respectivamente. Asimismo, la RAS a nivel fenotípico y genotípico se correlacionó de manera significativa y negativa con las variables GIP, AF, PCF y PMH. Los resultados sugieren que la selección basada en el parámetro RAS permitiría una mejora sustancial en los parámetros RAI, PDP, AF y PCF, ya que, al seleccionar accesiones con rasgos de resistencia o tolerancia a roya amarilla, se esperaría una reducción del porcentaje de daño, menor pérdida de las hojas, mayor superficie foliar y un incremento del peso de los frutos; esto revelaría que el área foliar es un factor influyente durante la etapa de floración y fructificación del café, pues es la encargada de exportar los carbohidratos necesarios para la ganancia de peso del fruto y grano (Marín-Garza et al., 2018; Rennie y Turgeon, 2009).



Altura de planta (AP). Diámetro del tallo (DT). Número de ramas por árbol (NRA). Número de ramas productivas (NRP). Longitud de ramas productiva (LRP). Número de nudos por rama (NNR). Longitud de los entrenudos (LEN). Longitud del internudo ortotrópico (LNO). Grado de inclinación de la planta (GIP). Área foliar (AF). Diámetro geométrico del fruto (DGF). Diámetro geométrico de la semilla (DGS). Peso de 100 frutos (PCF). Producción de frutos por planta (PFV). Porcentaje de frutos vanos (PFV). Porcentaje de daño por broca del café (PDB). Incidencia de roya amarilla (RAI). Severidad de roya amarilla (RAS). Porcentaje de infestación de Minador de la hoja del café (PMH). Porcentaje de defoliación de la planta (PDP). Los valores positivos y negativos se destacan mediante los colores azul y rojo, respectivamente.

Figura 3. Matriz de correlación de Pearson para 20 variables agromorfológicas evaluadas en la colección de germoplasma del INIA. Coeficiente de correlación fenotípica (diagonal superior). Coeficiente de variación genotípica (diagonal inferior). Significancia al 5 % (*). Significancia al 1 % (**).

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por Merga (2019) quienes observaron correlación positiva a nivel fenotípico y genotípico entre la incidencia de roya amarilla con altura de planta y longitud de rama plagiotrópica. Sin embargo, también observó relaciones positivas y negativas entre roya amarilla y área foliar para los dos niveles. Por otro lado, Kifle et al. (2018) observaron una asociación negativa de incidencia roya amarilla con altura de planta, longitud de rama plagiotrópica y área foliar para los niveles para las correlaciones fenotípicas y genotípicas, respectivamente. Finalmente, en este estudio se destacan altas correlaciones positivas y negativas para las variables agromorfológicas AP, DT, NRA, NRP, LRP, NNR, LEN y LNO, tanto a nivel fenotípico y genotípico. Se observó relaciones significativas y positivas para variable NRA con NRP; LNO con LEN; LRP con AP y LNO con AP. Los valores obtenidos para estas variables indican que seleccionando accesiones con mayor número de ramas plagiotrópicas se mejoraría la arquitectura de la planta de café (bajo y compacto) y los caracteres que conforman los componentes de la productividad.

4.4. Análisis de la diversidad fenotípica

4.4.1. Análisis de agrupamiento

El agrupamiento de las accesiones fue desarrollado mediante el método de optimización de Tocher (Tabla 7), adoptando la matriz de disimilaridad genética obtenida por la estimación de 19 variables agromorfológicas en base al estadístico D^2 o distancia generalizada de Mahalanobis. La distancia de Mahalanobis está basada en la covarianza de las variables comparadas, tiene la ventaja de usar las medias de los grupos y sus varianzas, y evita los problemas de escala y correlación inherentes en la distancia Euclidiana (Li y Jain, 2015). Estas características hacen de la distancia de Mahalanobis un método muy robusto al momento de medir las distancias mediante variables cuantitativas, asimismo, es considerada como el método de mayor utilidad por los mejoradores, debido a que proporciona una base racional para la selección de genotipos promisorios para el desarrollo de hibridaciones en programas de mejoramiento genético (Adem et al., 2020; Beksisa et al., 2017; Paw et al., 2020). El método de agrupación de Tocher, a partir de la matriz de disimilitud, identifica el par de individuos más similares y los que forman el grupo inicial, posteriormente, evalúa la posibilidad de una nueva distancia media individual dentro del grupo que es más pequeña que la de cualquier grupo. De esta forma, este método minimiza las distancias intragrupalas y maximiza las distancias intergrupales (Dutra Giles et al., 2019).

Tabla 7. Agrupación de 162 accesiones de *C. arabica* de la colección de germoplasma del INIA, obtenida mediante el método de Tocher con base en la distancia de Mahalanobis (D^2) utilizando 19 rasgos agromorfológicos.

| Grupo | Subgrupo | Número de accesiones | Accesiones |
|-------|----------|----------------------|---|
| 1 | A | 43 | 10 - 11 - 20 - 29 - 34 - 38 - 41 - 42 - 43 - 49 - 50 - 52 - 54 - 56 - 63 - 67 - 71 - 74 - 78 - 79 - 104 - 113 - 122 - 123 - 124 - 144 - 149 - 156 - 158 - 160 - 161 - 162 - 163 - 165 - 166 - 183 - 199 - 205 - 218 - 222 - 226 - 230 - 249 |
| | B | 35 | 12 - 15 - 18 - 22 - 31 - 44 - 45 - 60 - 61 - 66 - 68 - 73 - 76 - 77 - 80 - 81 - 105 - 108 - 114 - 119 - 136 - 138 - 139 - 141 - 143 - 147 - 150 - 152 - 155 - 167 - 168 - 229 - 233 - 236 - 248 |
| | C | 21 | 2 - 13 - 14 - 19 - 33 - 36 - 55 - 75 - 82 - 84 - 98 - 131 - 142 - 153 - 154 - 213 - 216 - 219 - 220 - 232 - 242 |
| | D | 5 | 39 - 47 - 65 - 117 - 130 |
| | E | 3 | 24 - 28 - 32 |
| | F | 2 | 35 - 174 |
| | G | 2 | 146 - 214 |
| | H | 2 | 17 - 48 |
| | I | 2 | 26 - 27 |
| | J | 2 | 1 - 7 |
| | K | 2 | 57 - 120 |
| | L | 2 | 3 - 23 |
| | M | 2 | 16 - 59 |
| | N | 1 | 58 |
| | Ñ | 1 | 8 |
| | O | 1 | 30 |
| | P | 1 | 64 |
| | Q | 1 | 21 |
| | R | 1 | 212 |
| | S | 1 | 101 |
| T | 1 | 137 | |
| U | 1 | 72 | |
| V | 1 | 126 | |
| 2 | | 10 | 9 - 25 - 51 - 100 - 133 - 135 - 157 - 164 - 169 - 228 |
| 3 | | 3 | 4 - 5 - 6 |
| 4 | | 5 | 69 - 70 - 110 - 112 - 134 |
| 5 | | 3 | 37 - 46 - 53 |
| 6 | | 2 | 83 - 200 |
| 7 | | 2 | 145 - 245 |
| 8 | | 2 | 172 - 173 |
| 9 | | 1 | 159 |
| 10 | | 1 | 203 |

El agrupamiento también mostró variabilidad fenotípica entre las accesiones de la colección de germoplasma de café del INIA, dividiéndose para 10 grupos o clases. La mayoría de las accesiones se aglomeró en el grupo 1, el cual fue de 133 accesiones (82,10 %). El grupo 2 reunió a 10 accesiones (6,17 %), el grupo 3 agrupó 4 accesiones (1,85 %), el grupo 4 a 5 accesiones (3,09 %), el grupo 5 agrupó 3 accesiones (1,85 %), el grupo 6, 7 y 8 reunió 2 accesiones cada uno (1,23 %) y el grupo 9 y 10 estuvieron conformados por apenas 1 accesión (0,62 %) cada una. Los grupos pequeños evidencian gran divergencia para sus fenotipos. Este padrón de tamaños y de cantidad de grupos ha sido observado anteriormente en

estudios de agrupamiento de *C. arabica* usando características agromorfológicas e indica que existe basta diversidad fenotípica entre las accesiones de café en estudio.

En Etiopia, Atinafu y Mohammed (2017b) y Atinafu et al. (2017) agruparon 124 genotipos en 10 grupos usando 10 características agromorfológicas, WeldeMichael (2019) agruparon 49 genotipos en 5 grupos, Beksisa et al. (2017) y Adem et al. (2020), clasificaron a 49 accesiones en 3 y 5 grupos, respectivamente. En Guatemala, Nakamura et al. (2013) agruparon 44 accesiones en 6 grupos usando el método de Ward. En Arabia Saudí, Tounekti et al. (2017) también verificaron la presencia de diversidad, a través del agrupamiento de 19 accesiones en 5 grupos. Con respecto a la especie *Coffea canephora*, en Brasil, usando el mismo método de agrupamiento descrito para este estudio Fonseca et al. (2006) agruparon 32 genotipos en 12 grupos utilizando 7 caracteres, F. L. da Silva et al. (2015), por su parte, agruparon 17 genotipos en 13 grupos, Covre et al. (2016) reportaron el agrupamiento de 34 genotipos en 10 grupos y, finalmente, Ivoglo et al. (2008) reportaron que 21 genotipos fueron agrupados en 9 grupos. Dutra Giles et al. (2019) agruparon 34 genotipos de *C. arabica* y *Coffea canephora* en 10 grupos mediante 10 características morfo-anatómicas.

Los valores medios de las características agromorfológicas para los 10 grupos formados son mostrados en la Figura 4. El grupo 1 presenta una gran amplitud en sus características evaluadas, debido a ello, para facilitar su interpretación se dividió en 23 subgrupos. De forma general, las accesiones de este grupo, principalmente se caracterizan por presentar niveles de resistencia variable a roya amarilla, además son medianamente productivos, los frutos y granos son de tamaño y peso mediano con un nivel alto de daño por broca del café.

Del grupo 1 se destacan las accesiones que se agrupan en los subgrupos 1A (accesión 20, 29, 38, 54, 67 y 71), 1D (accesión 117), 1E (accesión 24) y 1I (accesión 26 y 27) como futuros progenitores, debido a que presentan uno o más caracteres de interés agronómico que podrían ser seleccionados de forma simultánea o independiente a fin de mejorar un carácter en particular. Los genotipos de los subgrupos mencionados presentan valores superiores al promedio general en cuanto a producción tolerancia a la roya amarilla del café. La accesión 117 resalta por presentar resistencia completa a la roya amarilla, pero con un bajo desempeño productivo.

| Grupos | AP (m) | DT (cm) | NRA | NRP | LRP (cm) | NNR | LEN (cm) | LNO (cm) | AF (cm ²) | DGF (mm) | PCF (g) | PFP (kg) | DGS (mm) | PFV (%) | PDB (%) | RAI (%) | RAS | PMH (%) | PDP (%) | Min |
|--------|-----------|------------|--------|-------|-------------|-------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------|------------|------------|-----|
| 1 | 2,39 | 4,80 | 60,47 | 44,67 | 65,86 | 14,17 | 4,81 | 8,24 | 98,65 | 13,08 | 170,60 | 3,33 | 7,83 | 5,75 | 12,27 | 68,00 | 2,17 | 56,42 | 40,16 | |
| 2 | 3,36 | 5,80 | 58,68 | 43,52 | 75,86 | 12,22 | 6,39 | 11,74 | 102,43 | 14,05 | 205,96 | 1,83 | 8,76 | 6,51 | 11,28 | 84,98 | 3,11 | 53,32 | 50,60 | |
| 3 | 2,55 | 4,28 | 78,80 | 65,20 | 59,20 | 14,93 | 4,00 | 6,67 | 88,63 | 17,88 | 160,03 | 3,06 | 7,08 | 7,22 | 12,38 | 85,61 | 2,99 | 57,90 | 45,72 | |
| 4 | 2,85 | 5,46 | 47,20 | 30,08 | 74,12 | 11,12 | 7,12 | 12,40 | 94,44 | 13,72 | 174,08 | 1,69 | 8,18 | 9,51 | 15,48 | 24,23 | 0,32 | 67,25 | 19,97 | |
| 5 | 1,98 | 5,43 | 70,93 | 50,13 | 64,73 | 16,53 | 3,98 | 5,95 | 124,22 | 13,66 | 183,40 | 7,39 | 7,42 | 5,56 | 15,82 | 26,27 | 0,36 | 68,64 | 15,56 | |
| 6 | 3,08 | 5,69 | 55,40 | 41,40 | 80,00 | 13,00 | 6,25 | 11,17 | 86,85 | 12,77 | 124,27 | 1,93 | 7,71 | 6,47 | 28,43 | 88,64 | 3,37 | 39,55 | 43,50 | |
| 7 | 2,19 | 3,81 | 86,60 | 72,80 | 70,50 | 18,40 | 3,94 | 5,08 | 86,92 | 12,84 | 155,90 | 2,07 | 8,63 | 4,03 | 6,20 | 90,00 | 3,50 | 23,61 | 57,17 | |
| 8 | 2,80 | 5,05 | 54,60 | 42,80 | 77,40 | 13,70 | 5,75 | 10,23 | 245,78 | 13,17 | 174,87 | 3,95 | 7,92 | 10,00 | 7,17 | 60,17 | 1,43 | 59,62 | 39,67 | |
| 9 | 2,14 | 5,17 | 54,00 | 42,80 | 70,40 | 13,60 | 5,19 | 8,06 | 102,59 | 12,74 | 176,73 | 6,11 | 9,65 | 7,60 | 7,93 | 52,26 | 0,99 | 56,16 | 25,00 | |
| 10 | 2,92 | 5,54 | 116,80 | 73,60 | 87,20 | 21,80 | 4,00 | 5,08 | 111,88 | 13,50 | 225,20 | 4,69 | 9,21 | 4,00 | 12,00 | 9,46 | 0,08 | 54,34 | 11,67 | Max |

Altura de planta (AP). Diámetro del tallo (DT). Número de ramas por árbol (NRA). Número de ramas productivas (NRP). Longitud de ramas productiva (LRP). Número de nudos por rama (NNR). Longitud de los entrenudos (LEN). Longitud del internodo ortotrópico (LNO). Área foliar (AF). Diámetro geométrico del fruto (DGF). Diámetro geométrico de la semilla (DGS). Peso de 100 frutos (PCF). Producción de frutos por planta (PFP). Porcentaje de frutos vanos (PFV). Porcentaje de daño por broca del café (PDB). Incidencia de roya amarilla (RAI). Severidad de roya amarilla (RAS). Porcentaje de infestación de Minador de la hoja del café (PMH). Porcentaje de defoliación de la planta (PDP). Promedios altos e intermedios se destacan por presentar tonalidades de azul hasta azul claro, mientras que los valores promedio bajos son representados en tono blanco.

Figura 4. Valores medios de 19 características agro-morfológica evaluadas para 10 grupos obtenidos por el agrupamiento de 162 accesiones de *C. arabica* de la colección de germoplasma del INIA, a partir del método Tocher usando la distancia de Malanohobis (D^2).

El grupo 2 se caracteriza por presentar las accesiones de mayor porte y diámetro de tallo, pocas ramas plagiotrópicas, entrenudos distantes en el tallo y ramas, buen peso y tamaño de fruto y grano, pero con baja producción, además tienen una alta susceptibilidad y defoliación por roya amarilla.

El grupo 3 está conformado por plantas de porte bajo, muchas ramas plagiotrópicas, susceptibilidad a la roya amarilla y alta defoliación. El grupo 4 está formado por accesiones de porte medio, caracterizadas por tener el menor número de ramas plagiotrópicas, la mayor distancia de entrenudos tallo principal y en las ramas productivas, tolerancia a roya amarilla, pero con niveles de productividad muy por debajo del promedio general.

El grupo 5 está constituido por accesiones que sobresalen entre las más productivas y resistentes a roya amarilla, se caracterizan por ser plantas de porte bajo con muchas ramas plagiotrópicas, entrenudos muy cortos en la rama productiva, buen peso y tamaño de fruto y grano, baja tasa de defoliación y elevada pérdida de frutos por daño de broca. Estas accesiones pueden ser consideradas como materiales promisorios que deberían incluirse a los programas de mejora.

El grupo 6 reúne a las accesiones de porte alto con un menor número de ramas productivas, menor área foliar, mayor pérdida de frutos por broca del café, la más baja área foliar, baja productividad y una gran pérdida del follaje debido a una alta susceptibilidad por roya amarilla.

El grupo 7 muestra a las accesiones que tienen el menor diámetro de tallo, la menor distancia de entrenudos en las ramas y tallo principal, baja producción, baja pérdida por frutos vanos y daño por broca, y una alta susceptibilidad a roya amarilla. Las accesiones del grupo 8 exhiben la mayor área foliar y frutos vanos, además son susceptibles a roya amarilla y de productividad media. El grupo 9 se caracteriza por presentar el menor tamaño de fruto y el mayor tamaño de grano y tolerancia a roya amarilla. El grupo 10, interesantemente lo conforma sólo la accesión 203, el cual, debe de seleccionarse a fin de establecerlo como progenitor para la generación de híbridos de café. Esta accesión reúne la mayoría de los caracteres deseables presentando así el mayor número de ramas y nudos productivos, la menor longitud de entrenudo en el tallo principal, mayor peso de frutos, deseable tamaño de grano, baja pérdida por frutos flotantes, mediana productividad, resistencia a roya amarilla con baja tasa de defoliación al término de la cosecha. Finalmente, la divergencia genética mostrada por las accesiones del grupo 1 (1A, 1D, 1E y 1I), 5, 9 y 10 revelan una gran oportunidad para ser seleccionadas e incluirlos en un programa de mejoramiento del café peruano, a través de la

generación de híbridos o variedades de café de alto valor productivo y sanitario, la cual, son de interés comercial.

4.4.2. Análisis de componentes principales (ACP)

El ACP fue desarrollado para evaluar la importancia relativa de cada característica en la variabilidad de las accesiones estudiadas. La contribución de cada carácter expresado como componentes principales (vector Eigen), el valor de Eigen, la proporción y el acumulativo son mostrados en la Tabla 8. Los resultados indican que reteniendo a los primeros 5 componentes principales se logra explicar el 70,01 % de la variación total en la colección de germoplasma, asimismo, los valores de Eigen para los CP1, CP2, CP3, CP4 y CP5 fueron de 4,30; 3,85; 2,49; 1,51 y 1,51, respectivamente. Observaciones similares fueron reportadas por Ndikumana et al. (2021), Beksisa et al. (2017) y WeldeMichael et al. (2013) en análisis exploratorio de divergencia genética entre accesiones de *C. arabica*.

De forma conjunta el CP1 y CP2 acumuló el 42,89 % de la variancia inicial total, que puede ser explicada en función a las variables de mayor peso dentro de cada componente. Para el CP1, las variables de mayor contribución fueron la LNO (-0,39), LEN (-0,33) y PFP (0,33); mientras que para el segundo componente (CP2) las variables RAS (0,35) y RAI (0,34) se mostraron como las más relevantes. El CP3 representó el 13,09 % de la variación, donde las variables relacionadas al porte de la planta como LRP (0,45), NRA (0,39) y AP (0,38) fueron las de mayor contribución. El CP4 explicó el 7,96 % de la variación, donde la variable PDB (0,65) aportó de manera positiva y DGS (-0,52) aportó negativamente al componente. En cuanto al quinto componente (CP5), ésta aportó a penas con un 6,08 % de la variación total, en el cual, los caracteres de DGF (0,70) y DGS (-0,35) contribuyeron con valores polarizados para la representación gráfica de dispersión.

Interesantemente, las variables de mayor valor y próximos a la unidad en los primeros dos componentes principales implicarían que estos ejes midan esencialmente los caracteres que se correlacionan con el porte de la planta, la productividad y la resistencia a roya amarilla; revelando que el agrupamiento de las accesiones este principalmente influenciada por las variables LNO, PFP, RAI y RAS (Ndikumana et al., 2021; Yan y Rajcan, 2002). Además, en este estudio se destaca los Eigen vectores más sobresalientes del CP3, CP4 y CP5 por contribuir grandemente en la diferenciación de algunos grupos y que claramente se aprecia en los gráficos de dispersión (Figura 5). De hecho, las variables mencionadas para los cinco componentes principales se destacan por evidenciar una alta capacidad de discriminación entre las accesiones, motivo por el cual, se sugiere que estas variables sean consideradas como herramientas para el proceso de selección de progenitores en los programas de mejoramiento del café, ya que aportarán a una mejora significativa de la

producción y de la resistencia frente a roya amarilla. Sin embargo, la contribución de cada variable es heterogénea, variando según la investigación y la genética de los materiales utilizados; por ejemplo, en otras investigaciones de café utilizando análisis de componentes principales, Beksisa et al. (2017) observaron que las variables relacionadas a la ramas y altura de planta fueron los que más contribuyeron a los cuatro primeros componentes. Similarmente, WeldeMichael et al. (2013) reportaron que las longitudes de los internudos en el tallo principal y ramas productivas contribuyeron al CP1, mientras que la altura de planta y número de ramas productivas aportaron más al CP2. Por otro lado, Ndikumana et al. (2021) reportaron que las características relacionadas a la producción y sanidad contribuyeron más a la variación de 15 accesiones y 5 variedades comerciales de *C. arabica*.

Tabla 8. Eigen-vectores de los primeros cinco componentes principales (CP) para 19 variables agromorfológicas utilizados para clasificar a 162 accesiones de *C. arabica* de la colección de germoplasma del INIA.

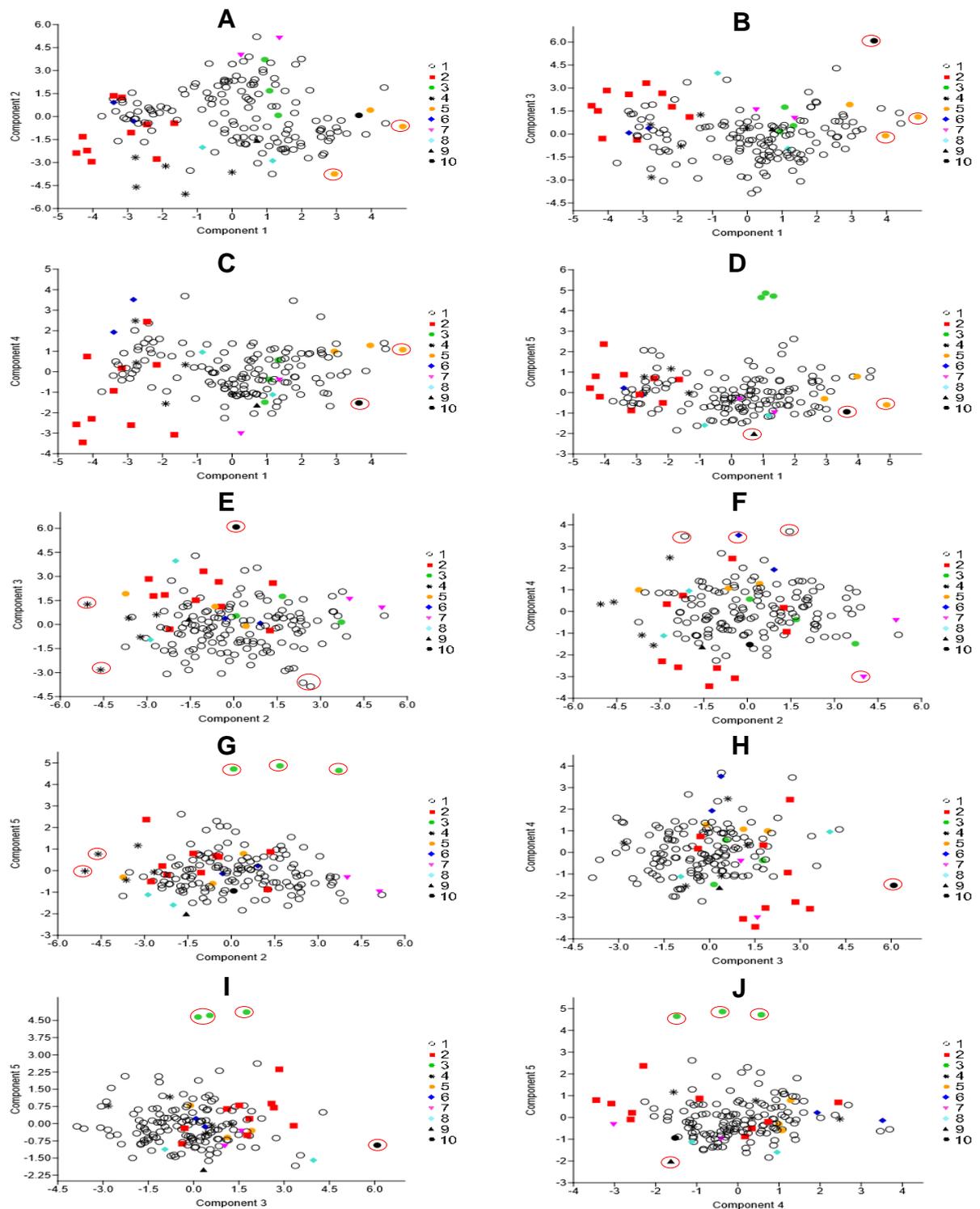
| Variables | Componentes principales | | | | |
|-----------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 | CP5 |
| AP (m) | -0,32 | -0,07 | 0,38 | 0,06 | 0,12 |
| DT (cm) | -0,14 | -0,20 | 0,33 | 0,20 | -0,07 |
| NRA | 0,21 | 0,26 | 0,39 | -0,05 | 0,18 |
| NRP | 0,24 | 0,24 | 0,35 | -0,08 | 0,22 |
| LRP (cm) | -0,23 | -0,04 | 0,45 | 0,15 | -0,22 |
| NNR | 0,18 | 0,26 | 0,35 | 0,12 | -0,25 |
| LEN (cm) | -0,35 | -0,27 | 0,04 | -0,01 | 0,07 |
| LNO (cm) | -0,39 | -0,25 | 0,00 | 0,09 | -0,02 |
| AF (cm ²) | 0,15 | -0,21 | 0,17 | 0,02 | -0,21 |
| DGF (mm) | -0,03 | -0,11 | 0,13 | -0,18 | 0,70 |
| PCF (g) | 0,03 | -0,27 | 0,25 | -0,34 | 0,06 |
| PFP (kg) | 0,33 | -0,12 | 0,11 | 0,22 | -0,09 |
| DGS (mm) | -0,15 | -0,09 | 0,16 | -0,52 | -0,35 |
| PFV (%) | 0,02 | -0,11 | 0,00 | -0,06 | 0,25 |
| PDB (%) | -0,04 | -0,09 | 0,02 | 0,65 | 0,14 |
| RAI (%) | -0,28 | 0,34 | -0,02 | 0,00 | 0,07 |
| RAS | -0,29 | 0,35 | -0,01 | 0,02 | 0,09 |
| PMH (%) | 0,18 | -0,31 | 0,01 | 0,06 | 0,15 |
| PDP (%) | -0,27 | 0,34 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Valor de Eigen | 4,30 | 3,85 | 2,49 | 1,51 | 1,15 |
| Proporción (%) | 22,61 | 20,28 | 13,09 | 7,96 | 6,08 |
| Acumulativo (%) | 22,61 | 42,89 | 55,97 | 63,93 | 70,01 |

Altura de planta (AP). Diámetro del tallo (DT). Número de ramas por árbol (NRA). Número de ramas productivas (NRP). Longitud de ramas productiva (LRP). Número de nudos por rama (NNR). Longitud de los entrenudos (LEN). Longitud del internudo ortotrópico (LNO). Área foliar (AF). Diámetro geométrico del fruto (DGF). Diámetro geométrico de la semilla (DGS). Peso de 100 frutos (PCF). Producción de frutos por planta (PFP). Porcentaje de frutos vanos (PFV). Porcentaje de daño por broca del café (PDB). Incidencia de roya amarilla (RAI). Severidad de roya amarilla (RAS). Porcentaje de infestación de Minador de la hoja del café (PMH). Porcentaje de defoliación de la planta (PDP).

Los gráficos de dispersión se elaboraron en base a los primeros cinco componentes principales, pues respaldan los resultados obtenidos por el análisis de agrupamiento realizado mediante el método de Tocher (Tabla 7), concordando con lo reportado por Heydari et al. (2019) y Kumari et al. (2016). Los gráficos de dispersión han sido ampliamente empleados para discriminar accesiones en diferentes cultivos (Aghae et al., 2010b), de modo que, el estudio de sus resultados en conjunto con el análisis de agrupamiento, son de gran importancia en programas de mejoramiento que buscan seleccionar adecuadamente a los progenitores menos relacionados que provengan de grupos distantes y que aporten con alelos deseables en diferentes loci a la progenie resultante (Adem et al., 2020; Fonseca et al., 2006).

La utilización de los gráficos de dispersión a partir de los CP1, CP2, CP3, CP 4 y CP5 permitió observar fácilmente a la mayoría de los grupos y/o accesiones más distantes en el plano cartesiano (Figura 5), en especial a las accesiones promisorias que se encuentran dentro del grupo 1 (subgrupo 1A, 1E, 1I), 5, 9 y 10, que se destacan por su productividad y resistencia a roya amarilla.

Los resultados gráficos indicarían correctamente las relaciones entre las características más relevantes que hizo que los grupos fueran más divergentes entre los demás. Para este caso, las combinaciones entre el componente principal 1 contra 2 (Figura 5A) y componente principal 2 contra 5 (Figura 5G) permitieron identificar a la gran mayoría de grupos, que son los más grandes y distantes, con excepción del grupo 6 que gráficamente tiende a sobreponerse con los grupos 1 y 2. Además, en la Figura 5A se puede discriminar a los mejores y peores grupos en cuanto a las características relacionadas a la productividad y resistencia a roya amarilla, que de hecho corresponderían a las accesiones que se ubicaron más lejos del punto de origen de las perpendiculares de los CP1 y CP2. Por lo tanto, la gráfica de dispersión mostrada en la Figura 5A, puede ser utilizada como respaldo para la selección de genotipos teniendo en cuenta los parámetros más importantes de este estudio, como lo son, la producción y resistencia a *H. vastatrix*. En este punto, Yan y Rajcan (2002) mencionan que la selección debe estar enfocada sobre la base del rendimiento debido a la facilidad de la medición y porque proporciona una mayor eficiencia en la estrategia de selección.



Los círculos rojos encierran a las accesiones divergentes que presentan caracteres de interés comercial. (A) Gráfico de dispersión del CP1 y del CP2. (B) Gráfico de dispersión del CP1 y del CP3. (C) Gráfico de dispersión del CP1 y del CP4. (D) Gráfico de dispersión del CP1 y del CP5. (E) Gráfico de dispersión del CP2 y del CP3. (F) Gráfico de dispersión del CP2 y del CP4. (G) Gráfico de dispersión del CP2 y del CP5. (H) Gráfico de dispersión del CP3 y del CP4. (I) Gráfico de dispersión del CP3 y del CP5. (J) Gráfico de dispersión del CP4 y del CP5.

Figura 5. Gráficos de dispersión de 162 accesiones de *C. arabica* de la colección de germoplasma del INIA, en relación con los primeros 5 componentes principales (CP) obtenidos a partir de 19 caracteres agromorfológicos.

Según lo mencionado y apoyándonos de la Figura 5A, indicamos que las accesiones contenidas en el cuarto cuadrante son las más destacadas, por presentar rendimientos por encima de la media general y que, además, reúnen caracteres de interés comercial como resistencia a roya amarilla. Entre los más promisorios se mencionan a las accesiones 46 y 53 que corresponden al grupo 5, seguido de las accesiones 38, 54, 20, 24, 26, 27, 29, 67, 71 y 159 que conforman los grupos 1 (subgrupo 1A, 1E y 1I) y 9, respectivamente. Asimismo, es importante mencionar a las accesiones 110 (grupo 4), 117 (grupo 1 y subgrupo 1D) y 203 (grupo 10), que se destacan por ser altamente resistentes a *H. vastatrix*, pero con baja a mediana producción. Por lo tanto, las accesiones promisorias identificadas podrían aprovecharse como estrategias de cruzamiento con el objetivo de generar líneas o variedades que logren heredar simultáneamente los caracteres más importantes y de interés comercial o para ampliar la base genética de la colección de germoplasma del INIA. De otro lado, las accesiones del grupo 1 (accesión 28 y 137), 2 (accesión 9, 164, 157 y 228), 4 (accesión 70 y 112) y 7 (accesión 145) presentaron rendimientos por debajo del promedio, pues se ubicaron en los puntos más alejados con respecto al origen del plano cartesiano. Asimismo, la información descrita puede ser corroborada con sólo observar la gráfica de dispersión y considerar a estas accesiones como vértices para trazar un polígono que contenga a todas las accesiones.

En las Figuras 5B, 5C y 5D, los componentes principales relacionan a la variable LNO y a las características que conforman los componentes de la productividad. Al respecto, la Figura 5B se aprecia una separación consistente entre las accesiones que presentan las longitudes de rama más y menos amplias, de manera que, en los extremos del primer y cuarto cuadrante se ubican las accesiones con menor longitud de rama y en el segundo y tercer cuadrante se localizan las accesiones con mayor longitud de rama, respectivamente. Análogamente, esta gráfica también puede discriminar a las accesiones de porte bajo y alto, que puede explicarse a lo mencionado anteriormente. Similarmente, en la Figura 5C, se muestra a las accesiones del grupo 5 y 6 como los más afectados por broca del café. Las accesiones del grupo 7, 8 y 9 exhibieron con los menores valores. La Figura 5D, destaca a las accesiones 4, 5 y 6 (grupo 3) con los mayores valores de DGF. La accesión 159 (grupo 9) obtuvo el menor diámetro de fruto. En cuanto a la Figura 5E, se resalta a la accesión 203 (grupo 10), debido a alto nivel de resistencia y a que presenta la mayor longitud de ramas productivas entre todos los grupos. En la Figura 5F, se logra distinguir ampliamente a los grupos 6 y 7, pues el primero tiene altos niveles de daño por broca y el segundo una baja tasa de daño. La Figura 5G, 5I y 5J se puede discriminar claramente al grupo 3 por su gran tamaño de fruto. Estas accesiones podrían ser seleccionadas para el mejoramiento del tamaño del fruto y grano. Finalmente, la

Figura 5H resalta la accesión 203 (grupo 10) por tener la mayor longitud de rama productiva, mientras que la accesión 83 (grupo 6) presenta valores altos de incidencia de broca del café.

Actualmente se comercializan en el mundo algunas variedades tradicionales altamente productivas y de alta calidad en taza, pero muchas de ellas son susceptibles a enfermedades y plagas. Durante muchos años se han realizado estudios para mejorar la producción, el vigor y la calidad de las plantas en varios países, como India, Brasil, Colombia, Costa Rica, Kenia, Tanzania, Etiopía, Angola y Portugal (van der Vossen et al., 2015). El cruce de padres divergentes promoverá la máxima recombinación y segregación de las progenies y, por lo tanto, mejorará los programas de reproducción (Tounekti et al., 2017). La caracterización agromorfológica de 162 accesiones de café de la colección de germoplasma de café del INIA evidenció un amplio rango de divergencia fenotípica, revelando genotipos potenciales para programas de mejoramiento genético, ya que las características relacionadas con la producción y resistencia a enfermedades podrían mejorarse, mediante selección y cruzamiento, utilizando divergencias accesiones con características superiores. Finalmente, estos resultados son valiosos en el contexto nacional peruano y, especialmente, en la región de la Selva Central donde no se puede garantizar la rentabilidad del producto a las familias cafetaleras, debido a la falta de asistencia técnica e infraestructura, que causan una baja producción y un deficiente manejo de plagas y enfermedades (INIA, 2019). Por lo tanto, el INIA, responsable de esta colección de germoplasma de café, debe mantener las estrategias de conservación que viene realizando. Además, deberá crearse un programa de mejoramiento que incluyan herramientas moleculares que puedan ayudar en la identificación y diferenciación de las variedades de café, en la construcción de mapas moleculares y en la identificación del Locus de Rasgos Cuantitativos (Al-Khayri et al., 2019).

4.5. Determinación de genotipos resistentes en campo

Para determinar el nivel de resistencia/susceptibilidad se realizó un análisis de agrupamiento para 168 accesiones de la colección de germoplasma de *C. arabica* del INIA, usando los promedios del índice de la enfermedad (IE) y área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE), para los ciclos productivos 2019-2020 y 2020-2021. Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) indican diferencias significativas entre las accesiones, tanto para el IE y ABCPE a un nivel de significancias del 95 y 99 % ($P \leq 0,05$ y $P \leq 0,01$). En general, el promedio de dos ciclos de evaluación de la epidemia fue de $16,97 \pm 10,97$ %, con rangos que van desde 0 y 35,66 % para el IE. Asimismo, el ABCPE obtuvo valores promedios de $1395,20 \pm 959,44$, con un rango mínimo de 0 y máximo de 3534,05, respectivamente.

En cuanto al análisis de agrupamiento mediante el uso del paquete “mclust”, separó a las accesiones en tres grandes grupos, que aglomeraron a las accesiones en resistentes, tolerantes y susceptibles (Tabla 9). El grupo de resistentes reunió a las 30 accesiones con mejor desempeño frente a la enfermedad, registrando promedios de IE y ABCPE de $2,23 \pm 1,52$ y $147,64 \pm 111,15$ para la epidemia del 2019-2020 y; $1,10 \pm 1,06$ y $56,63 \pm 70,93$ para el ciclo epidemiológico del 2020-2021, respectivamente. En base a estos resultados se seleccionó 13 accesiones de café (16, 20, 26, 46, 53, 62, 65, 70, 110, 117, 122, 130 y 203) con menor IE y ABCPE, los cuales se diferencian significativamente al resto de las accesiones por su reacción a *H. vastatrix*.

Por otro lado, los valores de IE del grupo de resistentes confirma la presencia de genes mayores (resistencia cualitativa) y menores (resistencia cuantitativa), que proveen a la planta una mayor protección, los cuales frenan a la enfermedad durante la época de la epidemia severa, entre enero y julio durante la etapa del llenado de grano y la cosecha. Además, de presentar mayor resistencia, estas accesiones seleccionadas muestran mejor desempeño productivo y con rasgos de interés, como el porte bajo y lo compacto del dosel de la planta, caracteres rasgo que permiten aumentar el número de plantas por hectárea e implementar estrategias de manejo agronómico eficiente. Por lo tanto, estas accesiones podrían seleccionarse como potenciales genitores para la generación de nuevas variedades con resistencia a roya amarilla.

El grupo de cafés tolerantes fue conformado por 38 accesiones, presentando un IE de $10,43 (\pm 4,23)$ y $5,01 (\pm 2,50)$ y ABCPE, $895,01 (\pm 487,68)$ y $286,56 (\pm 177,15)$, respectivamente para los ciclos epidemiológicos del 2019-2020 y 2020-2021. Mientras que, el grupo de susceptibles está representado por 100 accesiones que obtuvieron los más altos valores de IE ($27,41 \pm 5,32$; $22,74 \pm 5,92$) y ABCPE ($2624,44 \pm 688,50$; $1553,17 \pm 582,63$); para la cuantificación de las epidemias de dos años consecutivos. El grupo de accesiones tolerantes se caracterizó por presentar altas incidencia, pero con un bajo daño del área foliar, lo cual permite que los rendimientos no mermen en función a la enfermedad. Asimismo, en cuanto a la defoliación a diferencia de las accesiones resistentes y susceptibles, la pérdida de hojas fue debido a la alta producción y no a la caída por daños.

Tabla 9. Mínimo (Mín.), máximo (Máx.), promedio (Prom.) y desviación estándar (DE) del índice de la enfermedad (IE) y área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE) para 168 accesiones de *C. arabica* de la colección de germoplasma del INIA, calculados para los ciclos epidemiológicos 2019-2020 y 2020-2021.

| Clasificación | Nro. de accesiones | IE (2019-2020) | | | | IE (2020-2021) | | | | ABCPE (2019-2020) | | | | ABCPE (2020-2021) | | | |
|---------------|--------------------|---|-------|-------|--------|----------------|-------|-------|--------|-------------------|---------|---------|----------|-------------------|---------|---------|----------|
| | | Mín. | Máx. | Prom. | DE | Mín | Máx | Prom | DE | Mín | Máx | Prom | DE | Mín | Máx | Prom | DE |
| Resistente | 30 | 0,00 | 5,02 | 2,23 | ± 1,52 | 0,00 | 3,30 | 1,10 | ± 1,06 | 0,00 | 390,96 | 147,64 | ± 111,15 | 0,00 | 232,03 | 56,63 | ± 70,93 |
| Tolerante | 38 | 3,14 | 22,20 | 10,43 | ± 4,23 | 0,18 | 11,22 | 5,01 | ± 2,50 | 191,48 | 2276,53 | 895,01 | ± 487,68 | 28,63 | 788,38 | 286,56 | ± 177,15 |
| Susceptibles | 100 | 13,12 | 38,81 | 27,41 | ± 5,32 | 8,91 | 38,06 | 22,74 | ± 5,92 | 1061,69 | 4172,84 | 2624,44 | ± 688,50 | 491,74 | 3194,88 | 1553,17 | ± 582,63 |
| Resistente | | 16 - 20 - 26 - 27 - 28 - 34 - 38 - 39 - 43 - 46 - 47 - 52 - 53 - 57 - 62 - 63 - 65 - 69 - 70 - 74 - 104 - 110 - 112 - 117 - 122 - 130 - 134 - 135 - 149 - 203 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Tolerante | | 1 - 7 - 10 - 11 - 24 - 29 - 35 - 37 - 41 - 42 - 49 - 50 - 54 - 56 - 58 - 59 - 67 - 71 - 78 - 79 - 113 - 120 - 123 - 124 - 144 - 156 - 159 - 160 - 162 - 165 - 166 - 173 - 174 - 183 - 199 - 218 - 222 - 249 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Susceptibles | | 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 8 - 9 - 12 - 13 - 14 - 15 - 17 - 18 - 19 - 21 - 22 - 23 - 25 - 30 - 31 - 32 - 33 - 36 - 40 - 44 - 45 - 48 - 51 - 55 - 60 - 61 - 64 - 66 - 68 - 72 - 73 - 75 - 76 - 77 - 80 - 81 - 82 - 83 - 84 - 98 - 100 - 101 - 103 - 105 - 108 - 114 - 119 - 126 - 131 - 133 - 136 - 137 - 138 - 139 - 140 - 141 - 142 - 143 - 145 - 146 - 147 - 150 - 152 - 153 - 154 - 155 - 157 - 158 - 161 - 163 - 164 - 167 - 168 - 169 - 171 - 172 - 200 - 205 - 212 - 213 - 214 - 216 - 219 - 220 - 226 - 228 - 229 - 230 - 232 - 233 - 236 - 237 - 242 - 245 - 248 | | | | | | | | | | | | | | | |

Por otro lado, las accesiones resistentes, tolerantes y susceptibles se diferenciaron para la dilación del inicio de la epidemia, hasta por cuatro o más meses. Los susceptibles para el mes de abril, ya presentaban importante daño por la enfermedad, hasta algunos individuos presentación fuerte defoliación. Sin embargo, los resistentes y tolerantes recién empezaban a visualizarse el daño en los bordes de las hojas nuevas formadas en ese periodo, lo cual determino en bajas intensidades al término de la cosecha o ciclo productivo.

4.6. Análisis de los componentes de la resistencia

La inoculación con uredosporas de *H. vastatrix* en hojas separadas de café produjo lesiones típicas de la enfermedad en todos los sitios inoculados en las accesiones y cultivares en estudio, encontrándose diferencias significativas para todas las variables registradas a un nivel de significancias del 95 y 99 % ($P \leq 0,05$ y $P \leq 0,01$) (Tabla 10). De esta manera, los resultados obtenidos confirman gran diversidad fenotípica entre las accesiones estudiadas en cuanto el carácter de resistencia a roya amarilla, además, posibilita una eficiente selección de individuos para el mejoramiento de la resistente.

La técnica de inoculación utilizando microgotas de suspensión con uredosporas de *H. vastatrix* en hojas separadas de café fue eficiente al momento de discriminar entre accesiones y cultivares resistentes y susceptibles, que se explica por la presencia de infección de la variedad Caturra (control positivo), lo cual indicaría alta susceptibilidad al patógeno. Además, se desestimó infecciones procedentes de campo, debido a la ausencia de infección en el testigo positivo y negativo que se inocularon sólo con agua (Tabla 10). Estas observaciones apoyan la hipótesis que la infección observada en las accesiones es resultado de la infección por la inoculación artificial, lo que concuerda con lo encontrado por Álvarez L. y Alvarado A. (2002); Capucho et al., (2005, 2007); Lizardo-Chavez et al. (2020); Lizardo-Chavez et al. (2019) y Valencia et al. (2017).

Tabla 10. Resumen del análisis de varianza (ANOVA) para los cuadrados medios de las variables que conforman los componentes de la resistencia evaluadas en accesiones de colección de germoplasma de *C. arabica* del INIA y cultivares.

| Fuente de variación | GL | NL | NLE | FI | Sev | PI | PL |
|---------------------|-----|----------|----------|---------|---------|----------|------------|
| Accesión | 34 | 16,57 ** | 55,38 ** | 0,17 ** | 5,33 ** | 78,71 ** | 1169,43 ** |
| Error | 70 | 0,02 | 1,25 | 0,00 | 0,13 | 0,65 | 7,28 |
| CV (%) | 104 | 9,38 | 32,22 | 1,47 | 13,22 | 4,53 | 16,63 |
| Promedio | | 1,47 | 3,47 | 0,94 | 2,69 | 17,75 | 16,22 |

Grados de Libertad (GL). Número de lesiones (NL). Número de lesiones esporuladas (NLE). Frecuencia de infección (FI). Frecuencia de lesiones esporuladas (FLE). Severidad (Sev). Periodo de incubación (PI). Periodo de latencia (PL).

En general, todas las accesiones y cultivares presentaron lesiones típicas de la enfermedad, caracterizada por manchas circulares de color amarillo pálido que posteriormente, crecían hasta que posteriormente eran cubiertas con esporas del hongo. La utilización la técnica de inoculaciones artificiales permitió reducir el escape del genotipo a la infección por *H. vastatrix*, ya que, en la mayoría de las accesiones presentó un NL y FI de 10 y 1; es decir, en todos los sitios inoculados con microgotas se visibilizó lesiones que poco a poco fueron desarrollándose en el envés de las hojas de cada genotipo, sin embargo, las accesiones 110 y 134 presentaron en promedio 9 y 9,67 para el NL y 0,9 y 0,97 para la FI, respectivamente (Tabla 11). Estas diferencias encontradas en el NL y FI quizás es resultado de la homogeneización manual de la suspensión o de error humano; sin embargo, esto no impidió que se caracterizará la resistencia de las accesiones en discusión, ya que se pudo evaluar todos los componentes de la resistencia. Resultados similares fueron encontrados por Capucho et al. (2005) quienes estudiaron la resistencia de 50 poblaciones de café segregantes del UFV 2148-57 x H511.

Asimismo, el 48,57 % de las accesiones presentaron entre 1,33 y 10 NLE y el 51,42 % de las accesiones sólo lesiones cloróticas que no desarrollaron uredosporas. En cuanto al índice de esporulación (Sev), las accesiones y cultivares fueron agrupados según la escala de resistencia propuesto por Tamayo et al. (1995). El grupo con reacción de resistencia estuvo compuesto por el 51,42 % de individuos evaluados, siendo 16 accesiones (16, 20, 26, 27, 29, 47, 53, 62, 110, 117, 134 y 205) y 2 cultivares (Canf_1 y Cat); mientras que el 14,29 y 34,28 % agrupó individuos moderadamente resistentes (accesión 28, 32, 37, 52, 54) y susceptibles (accesión 38, 41, 63, 68, 102 y cultivares Catu_1, Catu_2, Catu_3, Canf_2 y Mar), respectivamente. Este modo de agrupamiento fue corroborado mediante un análisis de conglomerado, basado en la distancia Euclidiana estandarizada media y la técnica de agrupamiento jerárquico de Ward (Capucho, 2011; Zambolim et al., 2016), utilizando los seis componentes de la resistencia (Tabla 11 y Figura 6). Las accesiones con un alto nivel de resistencia fueron la 46 y 203, los cuales fueron de 1,90 y 1,93. Asimismo, 12 accesiones (16, 20, 26, 27, 29, 47, 53, 62, 110, 117, 134 y 205) y 2 cultivares (Canf_1 y Cat) presentaron puntajes de 2, determinándolos como resistentes.

La evaluación de la reacción a la inoculación también permitió identificar accesiones con resistencia moderada, es decir, sus valores de severidad que oscilaron entre 2,13 y 2,87. Entre todas las hipótesis, la más aceptada, es el quiebre de la resistencia, puesto que, tras años de exposición del hospedante ante el patógeno en una misma área y quizás con un manejo de la resistencia deficiente, generó el cambio en la estructura genética del patógeno, lo

cual parece vencer en primera instancia a los genes mayores (resistencia cualitativa) y poco a poco a los genes menores (resistencia cuantitativa).

Tabla 11. Promedios obtenidos de la evaluación de siete componentes de la resistencia horizontal para las accesiones de la colección de germoplasma de *C. arabica* del INIA y cultivares comerciales.

| Accesión/ Cultivar | NL | NLE | FI | Sev | PI | PL | Clasificación |
|-----------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|---------------|
| 16 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 20,00 | 0,00 | R |
| 20 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 17,00 | 0,00 | R |
| 26 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 20,00 | 0,00 | R |
| 27 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 17,00 | 0,00 | R |
| 28 | 9,67 | 3,00 | 0,97 | 2,35 | 17,00 | 0,00 | MR |
| 29 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 20,00 | 0,00 | R |
| 32 | 10,00 | 5,67 | 1,00 | 2,87 | 20,00 | 46,67 | MR |
| 37 | 10,00 | 5,33 | 1,00 | 2,80 | 20,00 | 41,33 | MR |
| 38 | 10,00 | 8,33 | 1,00 | 3,27 | 20,00 | 41,00 | S |
| 41 | 10,00 | 10,00 | 1,00 | 4,67 | 20,00 | 36,33 | S |
| 46 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 1,90 | 17,00 | 0,00 | R |
| 47 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 17,00 | 0,00 | R |
| 52 | 10,00 | 3,00 | 1,00 | 2,27 | 16,67 | 0,00 | MR |
| 53 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 17,00 | 0,00 | R |
| 54 | 10,00 | 2,00 | 1,00 | 2,40 | 20,00 | 0,00 | MR |
| 62 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 19,00 | 0,00 | R |
| 63 | 10,00 | 10,00 | 1,00 | 3,67 | 20,00 | 41,00 | S |
| 68 | 10,00 | 10,00 | 1,00 | 5,00 | 14,67 | 22,00 | S |
| 102 | 10,00 | 10,00 | 1,00 | 5,00 | 14,67 | 33,67 | S |
| 110 | 9,00 | 0,00 | 0,90 | 2,00 | 21,00 | 0,00 | R |
| 117 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 20,00 | 0,00 | R |
| 134 | 9,67 | 0,00 | 0,97 | 2,00 | 21,00 | 0,00 | R |
| 199 | 10,00 | 3,67 | 1,00 | 2,67 | 20,00 | 0,00 | R |
| 203 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 1,93 | 17,00 | 0,00 | R |
| 205 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 17,00 | 0,00 | R |
| Canf_1 | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 18,00 | 0,00 | R |
| Canf_2 | 10,00 | 9,00 | 1,00 | 3,13 | 30,00 | 44,67 | S |
| Canf_a | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - |
| Cat | 10,00 | 0,00 | 1,00 | 2,00 | 18,00 | 0,00 | R |
| Catu_1 | 10,00 | 10,00 | 1,00 | 5,00 | 18,00 | 28,33 | S |
| Catu_2 | 10,00 | 10,00 | 1,00 | 5,00 | 18,00 | 28,33 | S |
| Catu_3 | 10,00 | 10,00 | 1,00 | 5,00 | 17,67 | 28,67 | S |
| Catu_a | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - |
| H1 | 10,00 | 1,33 | 1,00 | 2,13 | 20,67 | 0,00 | R |
| Mars | 10,00 | 10,00 | 1,00 | 5,00 | 18,00 | 37,00 | S |

Número de lesiones (NL). Número de lesiones esporuladas (NLE). Frecuencia de infección (FI). Severidad (Sev). Periodo de incubación (PI). Periodo de latencia (PL). Resistente (R). Moderadamente resistente (MR). Susceptible (S).

Esta interacción genotipo-patógeno es observado en las accesiones clasificadas como moderadamente resistentes, esencialmente para la accesión 28, 32, 37, 52, 54 y el cultivar H1 (Centroamericano), que obtuvieron en promedio 3,00; 5,67; 5,33; 3,00; 2,00 y 1,33 de NLE,

es decir, se observó lesiones con uredosporas que cubrían por lo menos el 25 % de la mancha clorótica (grado 3), presentando también PL de 0,0; 46,67; 41,33; 0,0; 0,0 y 0,0 días después de la inoculación en algunas lesiones; sin embargo, en las pocas lesiones esporuladas en las accesiones 28, 52, 54 y H1, se encontraron PL de 51,66; 47,33; 51,00 y 55,00 (*datos no mostrados*).

Estos resultados concuerdan con lo reportado por (Lizardo-Chavez et al., 2020), quienes indican que el H1 (centroamericano) aún existe una respuesta de defensa que evita que roya amarilla culmine su ciclo a pesar de haber iniciado la infección, impidiendo, la producción de grandes unidades propagativas. Asimismo, las accesiones aglomeradas en el grupo de los moderadamente resistentes, en evaluaciones de campo se comportaron como a la roya amarilla, registrándose alta incidencias, baja severidad y defoliación en comparación con las accesiones susceptibles, además, los rendimientos se encuentran por encima de la media nacional, el cual es 752 kg/ha.

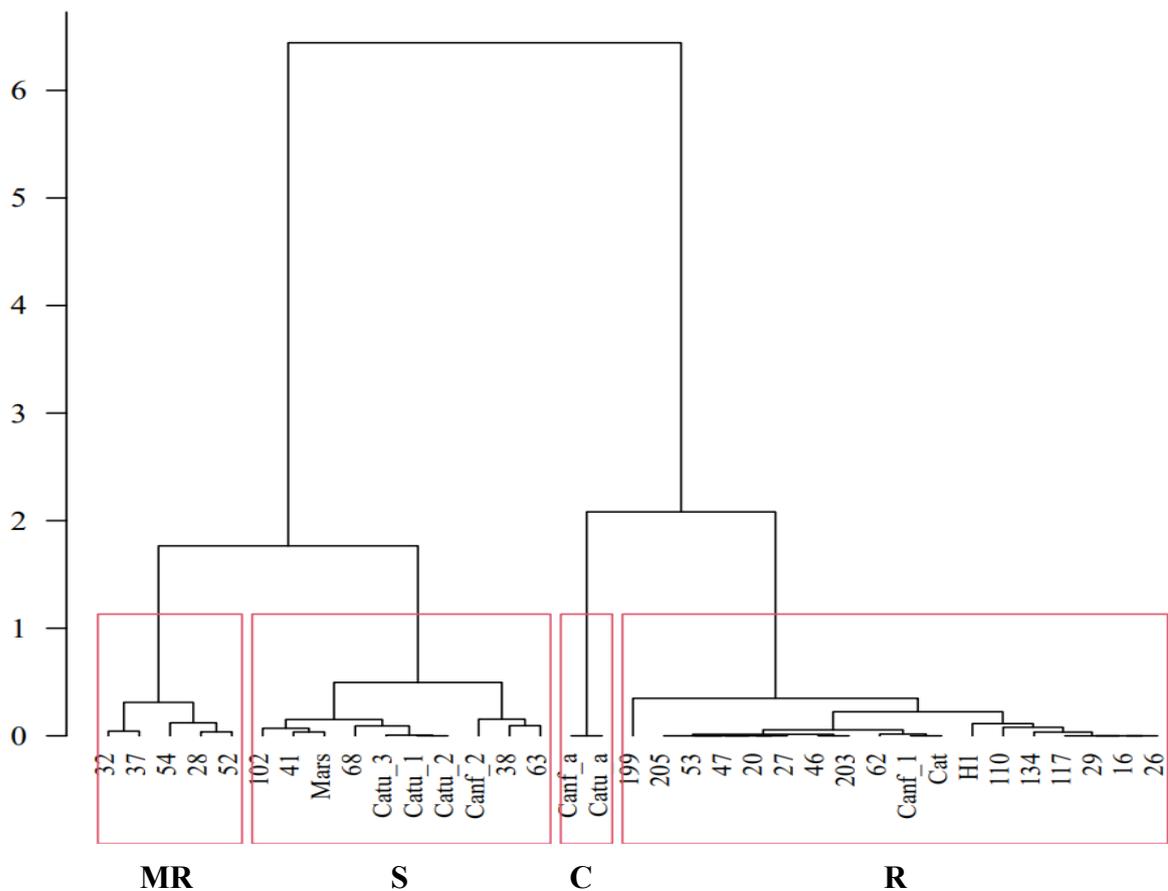


Figura 6. Dendrograma de accesiones y cultivares de *C. arabica* agrupados en base a sus niveles de resistencia a *H. vastatrix*. Moderadamente resistente (MR), susceptible (S), control (C), resistentes (R).

Por otro lado, las accesiones clasificadas como susceptibles fueron la 38, 41, 63, 68, Canf_2, Catu_1, Catu_2, Catu_3 y Mar, los cuales obtuvieron entre 3,13 a 5,0 de Sev; 14,67 a 30,00 en PI y 22,00 a 44,67 de PL, respectivamente. La accesión 68 fue la más susceptible, el cual tuvo la menor PI (14,67) y PL (22,0), mientras que, el cultivar Caturra (Catu_1, Catu_2, Catu_3) presentaron entre 17,67 a 18,0 y 28,33 a 28,67 para el PI y PL. Tanto la accesión 68 y el cultivar Caturra es posible que presenten de manera individual o en combinación los genes S_{H1} , S_{H2} , S_{H4} y S_{H5} que fueron vencidos por los genes de virulencia $v_{2,5}$, v_5 , y $v_{5,6}$ correspondientes a las razas fisiológicas I, II, y XXII, reportadas por (Quispe-Apaza et al., 2021).

Además, estos datos ratifican el ciclo biológico de *H. vastatrix* para las condiciones de Perú, lo que concuerdas con reportes de Álvarez L. y Alvarado A. (2002); Eskes (1989); Eskes y Toma-Braghini (1982); Nutman et al. (1963); Rayner, (1961); Toniutti et al. (2017); Valencia et al. (2017) y Waller, (1982). Asimismo, dentro de la categoría de resistente y susceptible se enco y ntró materiales derivados del *Coffea canephora*; el Canf_1 y Can_2 obtuvieron un PI de 18 y 30, y un PL de 0 y 44,67. Estos resultados podrían deberse a la biología reproductiva de la especie, que por presentar polinización cruzada quizás ha segregado los genes de resistencia S_{H6} , S_{H7} , S_{H8} y S_{H9} de manera individual y en combinación, resultando en genotipo susceptibles.

V. CONCLUSIONES

1. La colección de germoplasma de café del INIA mostró una amplia diversidad entre las accesiones estudiadas, lo que sugiere que esta variabilidad podría ser aprovechada para seleccionar progenitores superiores y generar nuevos individuos mediante hibridaciones.
2. Mediante el análisis de correlaciones genotípicas y fenotípicas entre las variables, se identificaron las accesiones con mejor desempeño agronómico y sanitario, es decir, aquellas que combinan el mayor número de características de interés comercial, lo que podría mejorar el rendimiento del café peruano.
3. Las 162 accesiones fueron clasificadas en 10 grupos divergentes basados en variables cuantitativas y análisis multivariante. Entre estos grupos, se seleccionaron como promisorias a las accesiones del subgrupo 1A (accesión 20, 29, 38, 54, 67 y 71), 1D (accesión 117), 1E (accesión 24), 1I (accesión 26 y 27), grupo 5 (accesión 46 y 53), grupo 9 (accesión 159) y grupo 10 (accesión 203), ya que presentan caracteres idóneos para el programa de mejora genética, enfocado en aspectos de producción y resistencia a la roya amarilla.
4. Utilizando el índice de enfermedad (IE) y el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE), se clasificó la colección de germoplasma en tres grandes grupos: resistentes (30 accesiones), tolerantes (38 accesiones) y susceptibles (100 accesiones) de *C. arabica*.
5. Las pruebas de resistencia mediante inoculaciones artificiales de uredosporas de *H. vastatrix* y el estudio de los componentes de la resistencia confirmaron que 16 accesiones (16, 20, 26, 27, 29, 47, 53, 62, 110, 117, 134 y 205) de la colección del INIA presentan resistencia cuantitativa a la enfermedad. Estas accesiones se caracterizan por no desarrollar uredosporas en las lesiones, lo que las convierte en potenciales donadores de genes de resistencia y adecuadas para el programa de manejo integrado de la roya amarilla en el café.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Realizar estudios de la caracterización química y organoléptica de las accesiones de *C. arabica* de la colección de germoplasma del INIA, dado que, cada vez los mercados demandan cafés descafeinado y con perfiles organolépticos destacados.
2. Desarrollar estudios de estabilidad productiva y de resistencia con los genotipos más prometedores en ambientes discriminantes de las regiones cafetaleras del país.
3. Verificar la resistencia mediante inoculaciones artificiales de los grupos fenotípicos identificados como resistentes y tolerantes en condiciones de campo.

VII. REFERENCIAS

- Adebo, H. O., Ahoton, L. E., Quenum, F., & Ezin, V. (2015). Agro-morphological characterization of *Corchorus olitorius* cultivars of benin. *Annual Research & Review in Biology*, 229-240. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2015/17642>
- Adem, A. (2020). Determination of linear model for coffee leaf area measurement. *Journal of Genetics Genomics and Plant Breeding*, 4 (3) 2020. <http://ejggpb.com/abstract.php?article=68>
- Adem, A., Mohammed, H., & Ayana, A. (2020). Phenotypic diversity in arabica coffee genotypes from Eastern Ethiopia. *International Journal of Ecotoxicology and Ecobiology*, 5(4), 42. <https://doi.org/10.11648/j.ijee.20200504.11>
- Aerts, R., Geeraert, L., Berecha, G., Hundera, K., Muys, B., De Kort, H., & Honnay, O. (2017). Conserving wild arabica coffee: Emerging threats and opportunities. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 237, 75-79. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.023>
- Aghae, M., Mohammadi, R., & Nabovati, S. (2010). Agro-morphological characterization of durum wheat accessions using pattern analysis. *Australian Journal of Crop Science*. <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.536537388993889>
- Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology*. Elsevier.
- Aguiar, A. T. E., Guerreiro-Filho, O., Maluf, M. P., Gallo, P. B., & Fazuoli, L. C. (2004). Caracterização de cultivares de *Coffea arabica* mediante utilização de descritores mínimos. *Bragantia*, 63(2), 179-192. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052004000200003>
- Aguiar, A. T. E., Fazuoli, L. C., Salva, T. de J. G., & Favarin, J. L. (2005). Chemical diversity in coffee species of genebank of Instituto Agronômico do estado de São Paulo. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 5(4).
- Alemayehu, D. (2019). Estimation of genetic component and heritability for quantitative traits in amaro coffee (*Coffea Arabica* L.) landrace at Awada, Southern Ethiopia. *Int. j. sci. res. sci. eng. technol*, 6, 1-9.
- Al-Khayri, J. M., Jain, S. M., & Johnson, D. V. (Eds.). (2019). *Advances in plant breeding strategies: Nut and beverage crops: Volume 4*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23112-5>
- Alvarado Alvarado, G., & Solórzano Buitrago, L. (2001). Caracterización de la resistencia incompleta a *Hemileia vastatrix* en genotipos de café en Colombia. *Cenicafé*, 52(1), 5-19.

- Alvarado, L., Vértiz, R., Jiménez, J., Borjas, R., Castro, V., & Julca, A. (2017). Agronomic characterization of 95 accessions in the bank of germplasm of coffee plant in Chanchamayo (Peru) year 2016. *Revista ECIPerú Volumen*, 14(1).
- Alvarado-Alvarado, G. (2004). Comportamiento de progenies de variedad Colombia en presencia de razas compatibles de roya del café. *Cenicafé*, 55(1), 69-92.2004.
- Alvarado-Alvarado, G., Cortina-Guerrero, H. A., & Moreno-Ruiz, L. G. (2000). Efecto depresivo de *Hemileia vastatrix* en la producción de genotipos de café con diferentes niveles de resistencia incompleta derivada del híbrido de Timor. *Cenicafé*, 51(3), 224-327.
- Alvarado-Huamán, L., Borjas-Ventura, R., Castro-Cepero, V., García-Nieves, L., Jiménez-Dávalos, J., Julca-Otiniano, A., & Gómez-Pando, L. (2020). Dynamics of severity of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) on coffee, in Chanchamayo (Junin-Peru). *Agronomía Mesoamericana*, 31(3), 517-529.
- Alvarez L., D. F., & Alvarado A., G. (2002). Evaluación de la resistencia incompleta de café a *Hemileia vastatrix* razas II y XXII en progenies de caturra x híbrido de Timor del grupo fisiológico E en condiciones de almácigo. *Cenicafé*, 52(4), 270-288.
- Anthony, F., Bertrand, B., Quiros, O., Wilches, A., Lashermes, P., Berthaud, J., & Charrier, A. (2001). Genetic diversity of wild coffee (*Coffea arabica* L.) using molecular markers. *Euphytica*, 118(1), 53-65. <https://doi.org/10.1023/A:1004013815166>
- Anthony, F., Combes, M., Astorga, C., Bertrand, B., Graziosi, G., & Lashermes, P. (2002). The origin of cultivated *Coffea arabica* L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 104(5), 894-900. <https://doi.org/10.1007/s00122-001-0798-8>
- Anthony, F., Astorga, C., Avendaño, J. & Dulloo, E. (2007). Conservation of coffee genetic resources in the CATIE field genebank. En Engelmann, F., Dulloo, M. E., Astorga, C., Dussert, S., & Anthony, F. (Eds.), *Conserving coffee genetic resources: Complementary strategies for ex situ conservation of coffee (Coffea arabica L.) genetic resources. A case study in CATIE, Costa Rica* (pp. 23-34). Topical reviews in Agricultural Biodiversity. Bioversity International.
- Araño-Leyva, L., Prieto-García, D., & Rodríguez-Patterson, F. (2017). Situación epidemiológica de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en las condiciones agroecológicas de Tercer Frente, Cuba1. *Café Cacao*, 16(1), 44-49.

- Atinafu, G., & Mohammed, H. (2017a). Association and path coefficient analysis of yield and yield attributes of coffee (*Coffea arabica* L.) under Sidama specialty coffee growing area, Awada, Southern Ethiopia. *Adv Crop Sci Tech*, 5(307), 2.
- Atinafu, G., & Mohammed, H. (2017b). Agro-morphological characterization of Sidama coffee (*Coffea arabica* L.) germplasm accession under its specialty coffee growing area, Awada, Southern Ethiopia. *Int. J. Res. Stud. Sci. Eng. Technol*, 4(12), 11-23.
- Atinafu, G., Mohammed, H., & Kufa, T. (2017). Genetic variability of Sidama coffee (*Coffea arabica* L.) landrace for agro-morphological traits at Awada, Southern Ethiopia. *Acad. Res. J. Agri. Sci. Res*, 5, 263-275.
- Avelino, J., Allinne, C., Cerda, R., Willocquet, L., & Savary, S. (2018). Multiple-disease system in coffee: From crop loss assessment to sustainable management. *Annual review of phytopathology*, 56, 611-635.
- Avelino, J., & Anzueto, F. (2020). Coffee rust epidemics in Central America: Chronicle of a resistance breakdown following the great epidemics of 2012 and 2013. *Emerging Plant Diseases and Global Food Security*, 185-198.
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A. J., & Morales, C. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food security*, 7(2), 303-321.
- Avelino, J., & Rivas, G. (2013). *La roya anaranjada del cafeto*.
- Avelino, J., Vílchez, S., Segura-Escobar, M. B., Brenes-Loaiza, M. A., Virginio Filho, E. de M., & Casanoves, F. (2020). Shade tree *Chloroleucon eurycyclum* promotes coffee leaf rust by reducing uredospore wash-off by rain. *Crop Protection*, 129, 105038. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105038>
- Avelino, J., Willocquet, L., & Savary, S. (2004). Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology*, 53(5), 541-547. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2004.01067.x>
- Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordoñez, M., & Savary, S. (2006). The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling*, 197(3), 431-447. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.03.013>
- Azinhaira, H. G., Guerra-Guimaraes, L., Silva, M. D. C., Várzea, V., & Ricardo, C. (2007). Esterase activity and adhesion during the early stages of *Hemileia vastatrix* differentiation. *21st International Conference on Coffee Science, Montpellier, France, 11-15 September, 2006*, 1325-1329.

- Barbin, D. F., Felicio, A. L. de S. M., Sun, D.-W., Nixdorf, S. L., & Hirooka, E. Y. (2014). Application of infrared spectral techniques on quality and compositional attributes of coffee: An overview. *Food Research International*, *61*, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.005>
- Beksisa, L., Ayano, A., & Benti, T. (2017). Correlation and path coefficient analysis for yield and yield components in some Ethiopian accessions of arabica coffee. *International Journal of Plant Breeding and Crop Science*, *4*(2), 178-18.
- Beksisa, L., Benti, T., & Weldemichael, G. (2021). Phenotypic diversity of Ethiopian coffee (*Coffea arabica* L.) accessions collected from Limmu coffee growing areas using multivariate analysis. *American Journal of BioScience*, *9*(3), 79-85.
- Belachew, K., Senbeta, G. A., Garedew, W., Barreto, R. W., & Del Ponte, E. M. (2020). Altitude is the main driver of coffee leaf rust epidemics: A large-scale survey in Ethiopia. *Tropical Plant Pathology*, *45*(5), 511-521. <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00383-4>
- Benti, T. (2017). Progress in Arabica coffee breeding in Ethiopia: Achievements, challenges and prospects. *Int J Sci Basic Appl Res*, *33*(2), 15-25.
- Berkeley, M. J., & Broome, C. E. (1869). *Hemileia vastatrix*. *Gard. Chron*, *6*, 1157.
- Bettencourt, A. J., & Carvalho, A. (1968). Melhoramento visando a resistência do cafeeiro à ferrugem. *Bragantia*, *27*(1), 35-68. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051968000100004>
- Borjas-Ventura, R., Alvarado-Huaman, L., Castro-Cepero, V., Rebaza-Fernández, D., Gómez-Pando, L., & Julca-Otiniano, A. (2020). Behavior of ten coffee cultivars against *Hemileia vastatrix* in San Ramón (Chanchamayo, Peru). *Agronomy*, *10*(12), Art. 12. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121867>
- Botelho, C. E., Mendes, A. N. G., Carvalho, G. R., Bartholo, G. F., & Carvalho, S. P. (2010). Seleção de progênies F4 de cafeeiros obtidas pelo cruzamento de Icatu com Catimor. *Revista Ceres*, *57*(3), 274-281.
- Boudrot, A., Pico, J., Merle, I., Granados, E., Vélchez, S., Tixier, P., Filho, E. de M. V., Casanoves, F., Tapia, A., Allinne, C., Rice, R. A., & Avelino, J. (2016). Shade Effects on the Dispersal of Airborne *Hemileia vastatrix* Uredospores. *Phytopathology*®, *106*(6), 572-580. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-15-0058-R>
- Brown, J. S., Whan, J. H., Kenny, M. K., & Merriman, P. R. (1995). The effect of coffee leaf rust on foliation and yield of coffee in Papua New Guinea. *Crop Protection*, *14*(7), 589-592. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(95\)00040-2](https://doi.org/10.1016/0261-2194(95)00040-2)

- Burbano-Figueroa, Ó. (2020). Resistencia de plantas a patógenos: Una revisión sobre los conceptos de resistencia vertical y horizontal. *Revista Argentina de Microbiología*, 52(3), 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.04.006>
- Cabral, P. G. C., Maciel-Zambolim, E., Oliveira, S. a. S., Caixeta, E. T., & Zambolim, L. (2016). Genetic diversity and structure of *Hemileia vastatrix* populations on *Coffea spp.* *Plant Pathology*, 65(2), 196-204. <https://doi.org/10.1111/ppa.12411>
- Cabral, P. G. C., Zambolim, E. M., Zambolim, L., Lelis, T. P., Capucho, A. S., & Caixeta, E. T. (2009). Identification of a new race of *Hemileia vastatrix* in Brazil. *Australasian Plant Disease Notes*, 4(1), 129-130. <https://doi.org/10.1071/DN09052>
- Capucho, A. S. (2011). *Epidemiologia e resistência do cafeeiro conilon à ferrugem* [Tese para obtenção do título de Doctor Scientiae, Universidade Federal de Viçosa]. Repositorio de Universidade Federal de Viçosa. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/415>
- Capucho, A. S., Caixeta, E. T., Zambolim, E. M., & Zambolim, L. (2009). Herança da resistência do Híbrido de Timor UFV 443-03 à ferrugem-do-cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44, 276-282. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000300009>
- Capucho, A. S., Rufino, R. J. N., Zambolim, E. M., Caixeta, E. T., Oliveira, A. C. B. de, Almeida, R. F. de, Brito, G. G. de, & Zambolim, L. (2005). Método de inoculação de *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. em folhas destacadas de cafeeiro. In: *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil* (4.: Londrina, PR: 2005). Anais. Brasília, D.F.: Embrapa - Café, 2005. (1 CD-ROM), 4p. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2081>
- Capucho, A. S., Zambolim, L., Cabral, P. G. C., Maciel-Zambolim, E., & Caixeta, E. T. (2013). Climate favourability to leaf rust in Conilon coffee. *Australasian Plant Pathology*, 42(5), 511-514. <https://doi.org/10.1007/s13313-012-0187-6>
- Capucho, A. S., Zambolim, L., Lopes, U. N., & Milagres, N. S. (2013). Chemical control of coffee leaf rust in *Coffea canephora* cv. Conilon. *Australasian Plant Pathology*, 42(6), 667-673. <https://doi.org/10.1007/s13313-013-0242-y>
- Capucho, A. S., Zambolim, L., Zambolim, E. M., Caixeta, E. T., Franchini, E. de A., & Pereira, A. A. (2007). Avaliação da resistência de cultivares de café à raça II de *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. In: *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil* (5.: Águas de Lindóia, SP: 2007). Anais. Brasília, D.F.: Embrapa - Café, 2007. (1 CD-ROM), 5p. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/2560>
- Carvalho, A., Eskes, A. B., Castillo-Z, M. S. J., Sreenivasan, M. S., Echeverri, J. H., Fernández, C. E., & Fazuoli, L. C. (1989a). Breeding Programs*. En Ajjamada C. Kushalappa

- (Eds.), *Coffee Rust: Epidemiology, Resistance and Management* (1st Edition, pp. 293-335). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351070775>
- Carvalho, A., Fazuoli, L. C., & Costa, W. M. da. (1989b). Melhoramento do cafeeiro: XLI. Produtividade do Híbrido de Timor, de seus derivados e de outras fontes de resistência a *Hemileia vastatrix*. *Bragantia*, 48, 73-86.
- Carvalho, A., & Monaco, L. (1969). The breeding of arabica coffee. *Outlines of perennial crop breeding in the tropics. Misc. Pap. Agric. Univ. Wageningen*, 4, 198-216.
- Carvalho, V. L. de, & Chalfoun, S. M. (2001). Comportamento de doenças do cafeeiro em sistema de plantio adensado. In: *Simpósio Brasileiro de Pesquisa dos Cafés do Brasil* (2.: 2001: Vitória, ES). Anais. Brasília, D.F.: Embrapa Café, 2001. (CD-ROM), p. 1083-1090
- Carvalho, G., Carvalho, C., Barreto, R., & Evans, H. (2014). Coffee rust genome measured using flow cytometry: Does size matter?. *Plant pathology*, 63(5), 1022-1026.
- Castañón-Nájera, G., Latournerie-Moreno, L., Mendoza-Elos, M., Vargas-López, A., & Cárdenas-Morales, H. (2008). Colección y caracterización de Chile (*Capsicum* spp) en Tabasco, México. *Phyton*, 77, 189-202.
- Castillo Z., J., & Alvarado A., G. (1997). Resistencia incompleta de genotipos de café a la roya bajo condiciones de campo en la región central de Colombia. *Cenicafé*, 48(1), 40–58.
- Castillo-Batista, A. P. del, Ponce-Saavedra, J., & Montero-Castro, J. C. (2017). Análisis morfométrico de *Cestrum guatemalense*, *C. mexicanum* y *C. pacayense* (Solanaceae). *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(1), 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.021>
- Cerda, R., Avelino, J., Gary, C., Tixier, P., Lechevallier, E., & Allinne, C. (2017). Primary and Secondary Yield Losses Caused by Pests and Diseases: Assessment and Modeling in Coffee. *PLOS One*, 12(1), e0169133. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169133>
- Chaparro, A. P., Cristancho, M. A., Cortina, H. A., & Gaitán, A. L. (2004). Genetic variability of *Coffea arabica* L. accessions from Ethiopia evaluated with RAPDs. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 51(3), 291-297. <https://doi.org/10.1023/B:GRES.0000024014.04471.9a>
- Cheserek, J. J., Ngugi, K., Muthomi, J. W., & Omondi, C. O. (2020). Genetic variability, heritability and correlation of quantitative traits for Arabusta coffee (*C. arabica* L. X Tetraploid *C. canephora* Pierre). *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 12(1), 50-57.

- Costa, M. J., Zambolim, L., Caixeta, E. T., & Pereira, A. A. (2007). Resistência de progênies de café Catimor à ferrugem. *Fitopatologia Brasileira*, 32, 121-130.
- Coutinho, T. A., Rijkenberg, F. H. J., & Van Asch, M. A. J. (1993). Appressorium formation by *Hemileia vastatrix*. *Mycological Research*, 97(8), 951-956. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80861-7](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80861-7)
- Coutinho, T. A., Rijkenberg, F. H. J., & Van Asch, M. A. J. (1995). Teliospores of *Hemileia vastatrix*. *Mycological Research*, 99(8), 932-934. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)80751-X](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)80751-X)
- Covre, A. M., Canal, L., Partelli, F. L., Alexandre, R. S., Ferreira, A., & Vieira, H. D. (2016). Development of clonal seedlings of promising Conilon coffee (*Coffea canephora*) genotypes. *Australian Journal of Crop Science*, 10(3), 385-392. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.03.p7235>
- Cristancho-Ardila, M. A., Escobar-Ochoa, C., & Ocampo-Muñoz, J. D. (2007). Evolución de razas de *Hemileia vastatrix* en Colombia. *Cenicafé*, 58(4), 340-359.
- Cruz, C. D. (2013). GENES: software para análise de dados em estatística experimental e em genética quantitativa. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35(3), 271-276.
- Cruz, C. D., & Souza Carneiro, P. C. (2006). *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético* (t. 1). Universidade Federal de Viçosa.
- Dalcomo, J. M., Vieira, H. D., Ferreira, A., Lima, W. L., Ferrão, R. G., Fonseca, A. F. A. da, Ferrao, M. a. G., & Partelli, F. L. (2015). Evaluation of genetic divergence among clones of conilon coffee after scheduled cycle pruning. *Genetics and Molecular Research*, 14(4), 15417-15426.
- Davis, A. P., Chadburn, H., Moat, J., O'Sullivan, R., Hargreaves, S., & Nic Lughadha, E. (2019). High extinction risk for wild coffee species and implications for coffee sector sustainability. *Science advances*, 5(1), eaav3473. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3473>
- Davis, A. P., Govaerts, R., Bridson, D. M., & Stoffelen, P. (2006). An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 152(4), 465-512. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2006.00584.x>
- Del Grossi, L., Sera, T., Sera, G. H., Fonseca, I. C. de B., Ito, D. S., Shigueoka, L. H., Andreazi, E., & Carvalho, F. G. (2013). Rust resistance in Arabic Coffee cultivars in northern Paraná. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 56, 27-33. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132013000100004>

- Deshmukh, S., Basu, M., & Reddy, P. (1986). Genetic variability, character association and path coefficients of quantitative traits in Virginia bunch varieties of groundnut. *Indian Journal of Agricultural Sciences*.
- Doehlemann, G., Ökmen, B., Zhu, W., & Sharon, A. (2017). Plant pathogenic fungi. *Microbiology spectrum*, 5(1). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.FUNK-0023-2016>
- Dubberstein, D., Partelli, F. L., Guilhen, J. H. S., Rodrigues, W. P., Ramalho, J. C., & Ribeiro-Barros, A. I. (2020). Research article biometric traits as a tool for the identification and breeding of *Coffea canephora* genotypes. *Genetics and Molecular Research*, 19(2). <https://doi.org/10.4238/gmr18541>
- Dutra Giles, J. A., Ferreira, A. D., Partelli, F. L., Aoyama, E. M., Ramalho, J. C., Ferreira, A., & Falqueto, A. R. (2019). Divergence and genetic parameters between *Coffea spp.* Genotypes based in foliar morpho-anatomical traits. *Scientia Horticulturae*, 245, 231-236. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.038>
- Eskes, A. B. (1982). The use of leaf disk inoculations in assessing resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*). *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 88(4), 127-141. <https://doi.org/10.1007/BF01977270>
- Eskes, A. B. (1983). Qualitative and quantitative variation in pathogenicity of races of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) detected in the State of São Paulo, Brazil. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 89(1), 31-45. <https://doi.org/10.1007/BF01974442>
- Eskes, A. B. (1989). Resistance. En Ajjamada C. Kushalappa (Eds.), *Coffee Rust: Epidemiology, resistance and management* (pp. 175-290). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351070775>
- Eskes, A. B., & Carvalho, A. (1983). Variation for incomplete resistance to *Hemileia vastatrix* in *Coffea arabica*. *Euphytica*, 32(2), 625-637. <https://doi.org/10.1007/BF00021476>
- Eskes, A. B., & Da Costa, W. M. (1983). Characterization of incomplete resistance to *Hemileia vastatrix* in the icatu coffee population. *Euphytica*, 32(2), 649-657. <https://doi.org/10.1007/BF00021478>
- Eskes, A. B., & Toma-Braghini, M. (1982). The use of leaf disk inoculations in assessing resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*). *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 88, 219-230. <https://doi.org/10.1007/BF02000128>
- Falconer, D. S., & Mackay, T. (2009). *Introduction to quantitative genetics* (t. 4). Pearson, Prentice Hall.

- Farah, A., & Ferreira dos Santos, T. (2015). The coffee plant and beans. En *coffee in health and disease prevention* (pp. 5-10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00001-2>
- Favarin, J. L., Dourado Neto, D., García y García, A., Villa Nova, N. A., & Favarin, M. da G. G. V. (2002). Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(6), 769-773. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000600005>
- Fazuoli, L. C., Braghini, M. T., Silvarolla, M. B., Gonçalves, W., Mistro, J. C., Gallo, P. B., & Guerreiro, O. (2019). IAC Catuaí SH3—A dwarf Arabica coffee cultivar with leaf rust resistance and drought tolerance. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 19, 356-359. <https://doi.org/10.1590/1984-70332019v19n3c48>
- Fernandes, R. de C., Evans, H. C., & Barreto, R. W. (2009). Confirmation of the occurrence of teliospores of *Hemileia vastatrix* in Brazil with observations on their mode of germination. *Tropical Plant Pathology*, 34, 108-113. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762009000200005>
- Ferrão, R. G., Cruz, C. D., Ferreira, A., Cecon, P. R., Ferrão, M. A. G., Fonseca, A. F. A. da, Carneiro, P. C. de S., & Silva, M. F. da. (2008). Parâmetros genéticos em café Conilon. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(1), 61-69. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000100009>
- Fonseca, A. F. A. da, Sedyama, T., Cruz, C. D., Sakaiyama, N. S., Ferrão, M. A. G., Ferrão, R. G., & Bragança, S. M. (2006). Divergência genética em café conilon. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(4), 599-605. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000400008>
- Flor, H. (1971). Current Status of the Gene-For-Gene Concept. *Annual Review of Phytopathology*, 9(1), 275-296. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.09.090171.001423>
- Gichuru, E., Alwora, G., Gimase, J., & Kathurima, C. (2021). Coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in Kenya—A review. *Agronomy*, 11(12), 2590.
- Giles, J. A. D., Partelli, F. L., Ferreira, A., Rodrigues, J. P., Oliosi, G., & Silva, F. H. L. E. (2018). Genetic diversity of promising ‘conilon’ coffee clones based on morpho-agronomic variables. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90, 2437-2446. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170523>
- Gouveia, M. M. C., Ribeiro, A., Várzea, V. M. P., & Rodrigues, C. J. (2005). Genetic diversity in *Hemileia vastatrix* based on RAPD markers. *Mycologia*, 97(2), 396-404. <https://doi.org/10.1080/15572536.2006.11832815>

- Gouy, M., Rousselle, Y., Thong Chane, A., Anglade, A., Royaert, S., Nibouche, S., & Costet, L. (2015). Genome wide association mapping of agro-morphological and disease resistance traits in sugarcane. *Euphytica*, 202(2), 269-284. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1294-y>
- Grasso, V., Sierotzki, H., Garibaldi, A., & Gisi, U. (2006). Relatedness among agronomically important rusts based on mitochondrial cytochrome b gene and ribosomal ITS Sequences. *Journal of Phytopathology*, 154(2), 110-118. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2006.01070.x>
- Gupta, P., Lal, R. K., & Banerjee, N. (2015). Stable genotype selection in vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash). *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 21(4), 392-409. <https://doi.org/10.1080/10496475.2014.995329>
- Hamer, J. E., Howard, R. J., Chumley, F. G., & Valent, B. (1988). A mechanism for surface attachment in spores of a plant pathogenic fungus. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.239.4837.288>
- Hedrick, P. W. (2009). *Genetics of populations*. Jones & Bartlett Publishers.
- Heydari, A., Hadian, J., Esmaili, H., Kanani, M. R., Mirjalili, M. H., & Sarkhosh, A. (2019). Introduction of *Thymus daenensis* into cultivation: Analysis of agro-morphological, phytochemical and genetic diversity of cultivated clones. *Industrial Crops and Products*, 131, 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.033>
- Hindorf, H., & Omondi, C. O. (2011). A review of three major fungal diseases of *Coffea arabica* L. in the rainforests of Ethiopia and progress in breeding for resistance in Kenya. *Journal of advanced research*, 2(2), 109-120.
- Huded, A. K. C., Jingade, P., Bychappa, M., & Mishra, M. K. (2020). Genetic diversity and population structure analysis of coffee (*Coffea canephora*) germplasm collections in indian gene bank employing srp and scot markers. *International Journal of Fruit Science*, 20(sup2), S757-S784. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1768618>
- International Coffee Organization (ICO). (2021a). *Coffee production by exporting country*. <http://www.ico.org/prices/po-production.pdf>
- International Coffee Organization (ICO). (2021b). *Monthly data for the last six months*. <http://www.ico.org/prices/m3-exports.pdf>
- Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). (2019). Sistematización de la experiencia de los subproyectos de café. Instituto Nacional de Innovación Agraria [INIA]. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/1368>

- Ivoglo, M. G., Fazuoli, L. C., Oliveira, A. C. B. de, Gallo, P. B., Mistro, J. C., Silvarolla, M. B., & Toma-Braghini, M. (2008). Divergência genética entre progênes de café robusta. *Bragantia*, 67(4), 823-831. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000400003>
- Júnior, S., Resende, M. L. V., Pozza, E. A., Ribeiro Júnior, P. M., Resende, A. R. M., Vasconcelos, V. A. M., & Vilela, R. O. (2015). Efeito do método de inoculação e do tempo de incubação sobre a severidade da ferrugem em mudas de cafeeiro. In: *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil* (41., 2015, Poços de Caldas). Anais. Brasília, DF.: Embrapa - Café, 2015. (1 CD-ROM), 3 p. <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/7349>
- Keen, N. T. (1990). Gene-for-Gene Complementarity in Plant-Pathogen Interactions. *Annual Review of Genetics*, 24(1), 447-463. <https://doi.org/10.1146/annurev.ge.24.120190.002311>
- Kifle, A. T., Ali, H. M., & Ayano, A. (2018). Correlation and path coefficient analysis of some coffee (*Coffea arabica L.*) accessions using quantitative traits in ethiopia. *International Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 5(2), 383-390.
- Koutouleas, A., Jørgen Lyngs Jørgensen, H., Jensen, B., Lillesø, J.-P. B., Junge, A., & Ræbild, A. (2019). On the hunt for the alternate host of *Hemileia vastatrix*. *Ecology and evolution*, 9(23), 13619-13631.
- Kumari, J., Bag, M. K., Pandey, S., Jha, S. K., Chauhan, S. S., Jha, G. K., Gautam, N. K., & Dutta, M. (2016). Assessment of phenotypic diversity in pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] germplasm of Indian origin and identification of trait-specific germplasm. *Crop and Pasture Science*, 67(12), 1223. <https://doi.org/10.1071/CP16300>
- Kushalappa, A. C. (1989). Biology and epidemiology. En Ajjamada C. Kushalappa (Eds.), *Coffee rust: Epidemiology, resistance and management* (pp. 13-80). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351070775>
- Lashermes, P., Combes, M. C., Robert, J., Trouslot, P., D'Hont, A., Anthony, F., & Charrier, A. (1999). Molecular characterisation and origin of the *Coffea arabica L.* genome. *Molecular and General Genetics MGG*, 261(2), 259-266.
- Lashermes, P., Combes, M.C., Topart, P., Graziosi, G., Bertrand, B., Anthony, F. (2000). Molecular breeding in coffee (*Coffea Arabica L.*). In: Sera, T., Soccol, C.R., Pandey, A., Roussos, S. (eds) *Coffee biotechnology and quality*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1068-8_7

- Leguizamón-Caycedo, J., Orozco-Gallego, L., & Gómez-Gómez, L. (1998). Períodos de incubación (PI) y de latencia (PL) de la roya del cafeto en la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé*, 49(4), 325-339.
- Li, S. Z., & Jain, A. K. (2015). *Encyclopedia of Biometrics*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7488-4>
- Linné, C., & Salvius, L. (1753). Species plantarum: exhibentes plantas rite cognitae, ad genera relatas, cum differentiis specificis, nominibus trivialibus, synonymis selectis, locis natalibus, secundum systema sexuale digestas. *Holmiae, Impensis Laurentii Salvii*, 1(1), 355-356. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/13829>
- Lizardo-Chavez, C. Y., Herrera-Zelaya, D. A., Buezo-Mejía, M., & Tróchez-Fernández, H. P. (2019). Resistencia horizontal a la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) de las variedades comerciales de café de Honduras. In: *XXV Simposio Latinoamericano de Caficultura, Panel 5: Evolución de la dinámica de plagas y enfermedades y alternativas de manejo para la resiliencia de los cafetales*. Honduras: PROMECAFE 2019, 10p.
- Lizardo-Chavez, C. Y., Paz-Sabillón, A., Herrera-Zelaya, D. A., & Tróchez-Fernández, H. P. (2020). Caracterización de la resistencia horizontal de la variedad lempira y del híbrido F1 centroamericano a la roya del café (*Hemileia vastatrix*). In: *XXIV Simposio Latinoamericano de Caficultura, Panel 5: Evolución de la dinámica de plagas y enfermedades*. Honduras: PROMECAFE 2020, 11p.
- Maghuly, F., Jankowicz-Cieslak, J., & Bado, S. (2020). Improving coffee species for pathogen resistance. *CAB Rev*, 15, 1-18.
- Mahalanobis, P. C. (1936). On the generalized distance in statistics. *Journ. Asiat. Soc. Bengal*, 16(1), 541-588.
- Maia, T., Badel, J. L., Fernandes, M. B., Bragança, C. A. D., Mizubuti, E. S. G., & Brommonschenkel, S. H. (2017). Variation in aggressiveness components in the *Hemileia vastatrix* population in Brazil. *Journal of Phytopathology*, 165(3), 174-188.
- Marín-Garza, T., Gómez-Merino, F. C., Aguilar-Rivera, N., Murguía-González, J., Trejo-Téllez, L. I., Pastelín-Solano, M. C., & Castañeda-Castro, O. (2018). Composición bioactiva de hojas de café durante un ciclo anual. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(4), 365-372. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.4.365-372>
- McCain, J. W., & Hennen, J. F. (1984). Development of the uredinial thallus and sorus in the orange coffee rust fungus, *Hemileia vastatrix*. *DEP*, 8, 5592.
- McCook, S. (2006). Global rust belt: *Hemileia vastatrix* and the ecological integration of world coffee production since 1850. *Journal of Global History*, 1(2), 177-195.

- McCook, S. (2009). La roya del café en Costa Rica: Epidemias, innovación y medio ambiente, 1950-1995. *Revista de Historia*, 59-60, 99-117.
- McCook, S., & Vandermeer, J. (2015). The big rust and the red queen: Long-term perspectives on coffee rust research. *Phytopathology*, 105(9), 1164-1173.
- McKinney, H. (1923). Influence of soil temperature and moisture on infection of wheat seedlings by helmin. *Journal of agricultural research*, 26, 195.
- McTaggart, A. R., Shivas, R. G., van der Nest, M. A., Roux, J., Wingfield, B. D., & Wingfield, M. J. (2016). Host jumps shaped the diversity of extant rust fungi (Pucciniales). *New Phytologist*, 209(3), 1149-1158. <https://doi.org/10.1111/nph.13686>
- Mendgen, K., Struck, C., Voegelé, R. T., & Hahn, M. (2000). Biotrophy and rust haustoria. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 56(4), 141-145.
- Meredith, D. S. (1973). Significance of spore release and dispersal mechanisms in plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 11(1), 313-342. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.11.090173.001525>
- Merga, D. (2019). Correlation and path coefficient analysis of quantitative traits in some wollega coffee (*Coffea arabica* L.) Landrace in Western Ethiopia. *Journal of Environment and Earth Science*. <https://doi.org/10.7176/JEES/9-4-01>
- Merga, D., Mohammed, H., & Ayano, A. (2021). Estimation of genetic variability, heritability and genetic advance of some wollega coffee (*Coffea arabica* L.) Landrace in Western Ethiopia using quantitative traits. *Journal of Plant Sciences*, 9(4), 182. <https://doi.org/10.11648/j.jps.20210904.18>
- Mohammadi, S. A., & Prasanna, B. M. (2003). Analysis of genetic diversity in crop plants—salient statistical tools and considerations. *Crop Science*, 43(4), 1235-1248. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1235>
- Nadaleti, D. H. S., de R. Abrahão, J. C., Andrade, V. T., Malta, M. R., Botelho, C. E., & Carvalho, G. R. (2022). Sensory quality characterization and selection from a *Coffea arabica* germplasm collection in Brazil. *Euphytica*, 218(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s10681-022-02985-2>
- Nair, K. P. (2010). *The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-64818-8>
- Nakamura, L. R., Bautista, E. A. L., & Quaresma, E. de S. (2013). Seleção de genótipos promissores de café: Uma abordagem multivariada. *Rev. Bras. Biom*, 31(4), 516-528.

- Nakilcioğlu-Taş, E., & Ötleş, S. (2019). Physical characterization of arabica ground coffee with different roasting degrees. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(2), e20180191. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180191>
- Ndikumana, J., Mwangi, G., Wainaina, C., & Obso, T. K. (2021). Agro-morphological characterization of arabica coffee cultivars in Burundi. *Int. J. Plant Breed. Genet.*, 15, 14-23. <https://doi.org/10.3923/ijpbg.2021.14.23>
- Nguyen, G. N., & Norton, S. L. (2020). Genebank phenomics: A strategic approach to enhance value and utilization of crop germplasm. *Plants*, 9(7), 817. <https://doi.org/10.3390/plants9070817>
- Niazian, M., & Niedbała, G. (2020). Machine learning for plant breeding and biotechnology. *Agriculture*, 10(10), 436. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100436>
- Nutman, F. J., Roberts, F. M., & Clarke, R. T. (1963). Studies on the biology of *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(1), 27-44. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80005-4](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80005-4)
- Ogutu, C., Fang, T., Yan, L., Wang, L., Huang, L., Wang, X., Ma, B., Deng, X., Owiti, A., Nyende, A., & Han, Y. (2016). Characterization and utilization of microsatellites in the *Coffea canephora* genome to assess genetic association between wild species in Kenya and cultivated coffee. *Tree Genetics & Genomes*, 12(3), 54. <https://doi.org/10.1007/s11295-016-1014-y>
- Olika, K., Sentayehu, A., Taye, K., & Weyessa, G. (2011). Variability of quantitative traits in Limmu coffee (*Coffea arabica* L.) in Ethiopia. *International journal of agricultural research*, 6(6), 482-493.
- Pagán, I., & García-Arenal, F. (2018). Tolerance to plant pathogens: Theory and experimental evidence. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(3), <https://doi.org/10.3390/ijms19030810>
- Parsaeian, M., Mirlohi, A., & Saeidi, G. (2011). Study of genetic variation in sesame (*Sesamum indicum* L.) using agro-morphological traits and ISSR markers. *Russian Journal of Genetics*, 47(3), 314-321. <https://doi.org/10.1134/S1022795411030136>
- Paudel, D. B., & Sanfaçon, H. (2018). Exploring the diversity of mechanisms associated with plant tolerance to virus infection. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.01575>
- Paw, M., Munda, S., Borah, A., Pandey, S. Kr., & Lal, M. (2020). Estimation of variability, genetic divergence, correlation studies of *Curcuma caesia* Roxb. *Journal of Applied*

- Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 17, 100251.
<https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100251>
- Petek, M. R., Sera, T., Sera, G. H., Fonseca, I. C. de B., & Ito, D. S. (2006). Seleção de progênies de *Coffea arabica* com resistência simultânea à mancha aureolada e à ferrugem alaranjada. *Bragantia*, 65, 65-73.
- Prakash, N. S., Combes, M.-C., Dussert, S., Naveen, S., & Lashermes, P. (2005). Analysis of genetic diversity in Indian robusta coffee genepool (*Coffea canephora*) in comparison with a representative core collection using SSRs and AFLPs. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 52(3), 333-343. <https://doi.org/10.1007/s10722-003-2125-5>
- Prakash, N. S., Marques, D. V., Varzea, V. M. P., Silva, M. C., Combes, M. C., & Lashermes, P. (2004). Introgression molecular analysis of a leaf rust resistance gene from *Coffea liberica* into *C. arabica* L. *Theoretical and Applied Genetics*, 109(6), 1311-1317. <https://doi.org/10.1007/s00122-004-1748-z>
- Priyanka, V., Kumar, R., Dhaliwal, I., & Kaushik, P. (2021). Germplasm conservation: instrumental in agricultural biodiversity—A review. *Sustainability*, 13(12), 12. <https://doi.org/10.3390/su13126743>
- Quispe-Apaza, C., Mansilla-Samaniego, R., Espejo-Joya, R., Bernacchia, G., Yabar-Larios, M., & López-Bonilla, C. (2021). Spatial and temporal genetic diversity and population structure of *Hemileia vastatrix* from peruvian coffee plantations. *The Plant Pathology Journal*, 37(3), 280-290. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.10.2020.0192>
- Quispe-Apaza, C. S., Mansilla-Samaniego, R. C., López-Bonilla, C. F., Espejo-Joya, R., Villanueva-Caceda, J., & Monzón, C. (2017). Diversidad genética de *Hemileia vastatrix* de dos zonas productoras de café en el Perú. *Revista mexicana de fitopatología*, 35(3), 418-436.
- R Core Team, R. (2013). R: A language and environment for statistical computing.
- Ramiro, D. A., Escoute, J., Petitot, A.-S., Nicole, M., Maluf, M. P., & Fernandez, D. (2009). Biphasic haustorial differentiation of coffee rust (*Hemileia vastatrix* race II) associated with defence responses in resistant and susceptible coffee cultivars. *Plant Pathology*, 58(5), 944-955. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02122.x>
- Rayner, R. W. (1961). Germination and penetration studies on coffee rust (*Hemileia vastatrix* B. & Br.). *Annals of Applied Biology*, 49(3), 497-505. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1961.tb03641.x>

- Rennie, E. A., & Turgeon, R. (2009). A comprehensive picture of phloem loading strategies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(33), 14162-14167. <https://doi.org/10.1073/pnas.0902279106>
- Rodrigues, W. N., Tomaz, M. A., Apostólico, M. A., Colodetti, T. V., Martins, L. D., Christo, L. F., Brinate, S. V. B., Jr, W. C. de J., & Amaral, J. F. T. do. (2014). Severity of leaf rust and brown eyespot in genotypes of *Coffea arabica* L. cultivated with high plant density. *American Journal of Plant Sciences*, *5*(25), 25. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.525386>
- Rodriguez M., K. D., & Moreno R., L. G. (2002). Supervivencia relativa de las razas II y XXII de *Hemileia vastatrix*. *Cenicafé*, *53*(3), 252-265. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/1028>
- Rozo P., Y. I., & Cristancho A., M. A. (2010). Evaluación de la susceptibilidad de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br., a fungicidas del grupo de los triazoles. *Cenicafé*, *61*(4), 297-314. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/504>
- Rozo, Y., Escobar, C., Gaitán, Á., & Cristancho, M. (2012). Aggressiveness and genetic diversity of *Hemileia vastatrix* during an epidemic in Colombia. *Journal of Phytopathology*, *160*(11-12), 732-740. <https://doi.org/10.1111/jph.12024>
- Sánchez, H. S. (2005). Coevolución genética de la interacción parásito-hospedero. *Ciencia ergo-sum*, *12*(2), 144-148.
- Santacreo, R. (1989). Evaluación del nivel de resistencia horizontal a *Hemileia vastatrix* Berk et Br. en germoplasma de *Coffea arabica* L. y Catimor. *CATIE*, *39*(3), 377-386. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10726>
- Santana, M. F., Zambolim, E. M., Caixeta, E. T., & Zambolim, L. (2018). Population genetic structure of the coffee pathogen *Hemileia vastatrix* in Minas Gerais, Brazil. *Tropical Plant Pathology*, *43*(5), 473-476.
- Sanwal, S., Singh, Dr. B., Singh, V., & Mann, A. (2015). Multivariate analysis and its implication in breeding of desired plant type in garden pea (*Pisum sativum*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, *85*, 1298-1302.
- Scrucca, L., Fop, M., Murphy, T., Brendan, & Raftery, A., E. (2016). mclust 5: Clustering, classification and density estimation using gaussian finite mixture models. *The R Journal*, *8*(1), 289. <https://doi.org/10.32614/RJ-2016-021>
- Sera, G. H., de Carvalho, C. H. S., de Rezende Abrahão, J. C., Pozza, E. A., Matiello, J. B., de Almeida, S. R., Bartelega, L., & dos Santos Botelho, D. M. (2022). Coffee Leaf Rust in

- Brazil: Historical Events, Current Situation, and Control Measures. *Agronomy*, 12(2), 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020496>
- Sera, G. H., Sera, T., Fonseca, I. C. de B., & Ito, D. S. (2010). Resistência à ferrugem alaranjada em cultivares de café. *Coffee Science*, 5(1), 1.
- Sera, G. H., Sera, T., Ito, D. S., Azevedo, J. A. de, Mata, J. S. da, Dói, D. S., Ribeiro Filho, C., & Kanayama, F. S. (2007a). Resistance to leaf rust in coffee carrying SH3 gene and others SH genes. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 50(5), 753-757. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132007000500002>
- Sera, G. H., Sera, T., Ito, D. S., Azevedo, J. A. de, Mata, J. S. da, & Ribeiro Filho, C. (2007b). Selection for durable resistance to leaf rust using test-crosses on IAPAR-59 and Tupi IAC 1669-33 cultivars of *Coffea arabica*. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 50(4), 565-570. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132007000400001>
- Shaner, G., & Finney, R. E. (1977). The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in Knox wheat. *Phytopathology*, 67(8), 1051-1056.
- Shigueoka, L. H., Sera, G. H., Sera, T., Fonseca, I. C. de B., Mariucci Junior, V., Andreazi, E., Carvalho, F. G., Gardiano, C. G., & Carducci, F. C. (2014). Selection of arabic coffee progenies with rust resistance. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 14, 88-93. <https://doi.org/10.1590/1984-70332014v14n2a16>
- Silva Acuña, R., Zambolim, L., & Pérez Nieto, E. (1997). Identificación de razas fisiológicas de la roya del cafeto en el estado Táchira, Venezuela. *BioAgro*, 9, 95-98.
- Silva, D. G., Zambolim, L., Sakiyama, N. S., Pereira, A. A., Fonseca, A. F. A. da, & Vale, F. X. R. do. (2000). Resistência de clones de *Coffea*. *Canephora VAR. conillon a quatro raças de Hemileia vastatrix BERK et Br.* <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/902704>
- Silva, D. N., Vieira, A., Talhinhos, P., Azinheira, H. G., Silva, M. D. C., Fernández, D., ... & Batista, D. (2012). Phylogenetic analysis of *Hemileia vastatrix* and related taxa using a genome-scale approach. In: 24. *International Conference on Coffee Science*. ASIC, 2012, Nov 2012, San José, Costa Rica. 5p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01267895>
- Silva, D. G. da, Zambolim, L., Sakiyama, N. S., Pereira, A. A., Fonseca, A. F. A. da, & Vale, F. X. R. do. (2000). Identificação de raças fisiológicas de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. No estado do Espírito Santo, Brasil. In: *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil* (1.: 2000: Poços de Caldas, MG). Resumos expandidos. Brasília, D.F.: Embrapa Café;

- Belo Horizonte: Minasplan, 2000. 2v. (1490p.), p. 187-191.
<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/554>
- Silva, F. L., Ferreira Baff, D. C., Costa de Rezende, J., Baião de Oliveira, A. C., Alves Pereira, A., & Cruz, C. D. (2015). Variabilidade genética entre genótipos de café robusta no estado. *Coffee Science, Lavras*, 10 (1), 20-27.
- Silva, J. A., Carvalho, S. P., Bruzi, A. T., & Guimarães, R. J. (2016). Genetic diversity among coffee tree progenies big coffee VL based on growth traits and production. *Gineta. mol. Res*, 15(4), gmr15049066. <https://doi.org/10.4238/gmr15049066>
- Silva, M. B., Zambolim, L., Pereira, A. A., Sakiyama, N. S., & Vale, F. X. R. do. (2000). Resistência à ferrugem do cafeeiro de progênies de híbridos de Catuaí e Mundo Novo com o híbrido de Timor. In: *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil* (1.: 2000: Poços de Caldas, MG). Resumos expandidos. Brasília, D.F.: Embrapa Café; Belo Horizonte: Minasplan, 2000. 2v. (1490p.), p. 599-605.
<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/811>
- Silva, M. C., Nicole, M., Rijo, L., Geiger, J. P., & Rodrigues, Jr, C. J. (1999). Cytochemical aspects of the plant–rust fungus interface during the compatible interaction *Coffea arabica* (cv. Caturra)–*Hemileia vastatrix* (race III). *International Journal of Plant Sciences*, 160(1), 79-91. <https://doi.org/10.1086/314113>
- Silva, M. D. C., Várzea, V., Guerra-Guimarães, L., Azinheira, H. G., Fernandez, D., Petitot, A. S., ... & Nicole, M. (2006). Coffee resistance to the main diseases: leaf rust and coffee berry disease. *Brazilian journal of plant physiology*, 18, 119-147. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100010>
- Silva, M. do C., Guerra-Guimarães, L., Diniz, I., Loureiro, A., Azinheira, H., Pereira, A. P., Tavares, S., Batista, D., & Várzea, V. (2022). An overview of the mechanisms involved in Coffee-*Hemileia vastatrix* Interactions: Plant and Pathogen Perspectives. *Agronomy*, 12(2), Art. 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020326>
- Silva, M. do C., Várzea, V., Guerra-Guimarães, L., Azinheira, H. G., Fernandez, D., Petitot, A.-S., Bertrand, B., Lashermes, P., & Nicole, M. (2006). Coffee resistance to the main diseases: Leaf rust and coffee berry disease. *Brazilian journal of plant physiology*, 18(1), 119-147.
- Silva, R. A., Zambolim, L., Castro, I. S. L., Rodrigues, H. S., Cruz, C. D., & Caixeta, E. T. (2018). The Híbrido de Timor germplasm: Identification of molecular diversity and resistance sources to coffee berry disease and leaf rust. *Euphytica*, 214(9), 153. <https://doi.org/10.1007/s10681-018-2231-2>

- Silvarolla, M. B., Mazzafera, P., & Lima, M. M. A. de. (2000). Caffeine content of Ethiopian *Coffea arabica* beans. *Genetics and Molecular Biology*, 23, 213-215. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572000000100036>
- Silvestrini, M., Junqueira, M. G., Favarin, A. C., Guerreiro-Filho, O., Maluf, M. P., Silvarolla, M. B., & Colombo, C. A. (2007). Genetic diversity and structure of Ethiopian, Yemen and Brazilian *Coffea arabica* L. accessions using microsatellites markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 54(6), 1367-1379. <https://doi.org/10.1007/s10722-006-9122-4>
- Singh, D. (1981). The relative importance of characters affecting genetic divergence. *The Indian Journal of Genetic and Plant Breeding*, 41(2), 237-245.
- Souza, C. A. de, Rocha, R. B., Alves, E. A., Teixeira, A. L., Dalazen, J. R., & Fonseca, A. F. A. da. (2018). Characterization of beverage quality in *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner. *Coffee Science, Lavras*, 13(2), 210-218.
- Talamini, V., Pozza, E. A., Souza, P. E. de, & Silva, A. M. da. (2003). Progresso da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro (*coffea arabica* L.) Com diferentes épocas de início e parcelamentos da fertirrigação. *Ciência e Agrotecnologia*, 27, 141-149. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542003000100017>
- Talhinhas, P., Batista, D., Diniz, I., Vieira, A., Silva, D. N., Loureiro, A., Tavares, S., Pereira, A. P., Azinheira, H. G., & Guerra-Guimarães, L. (2017). The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: One and a half centuries around the tropics. *Molecular plant pathology*, 18(8), 1039.
- Tamayo, P. J., Vale, F. do, Zambolim, L., Chaves, G. M., & Pereira, A. A. (1995). Resistência do catimor à ferrugem e virulência de raças fisiológicas de *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. *Fitopatologia Brasileira, Brasília*, 20(4), 572-576.
- Teixeira, A. L., Gonçalves, F. M. A., Rezende, J. C. de, Rocha, R. B., & Pereira, A. A. (2013). Principal component analysis on morphological traits teixeira, in juvenile stage arabica coffee. *Coffee Science, Lavras*, 8(2), 197-202.
- Teixeira, J. H. dos S., Guimarães, M. A. S., Cardoso, S. C., Brito, A. dos S., Diniz, R. P., de Oliveira, E. J., & de Oliveira, S. A. S. (2021). Evaluation of resistance to bacterial blight in Brazilian cassava germoplasm and disease-yield relationships. *Tropical Plant Pathology*, 46(3), 324-335. <https://doi.org/10.1007/s40858-021-00419-3>
- Toniutti, L., Breitler, J.-C., Etienne, H., Campa, C., Doubeau, S., Urban, L., Lambot, C., Pinilla, J.-C. H., & Bertrand, B. (2017). Influence of environmental conditions and genetic background of arabica coffee (*C. arabica* L.) on leaf rust (*Hemileia vastatrix*)

- Pathogenesis. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.02025>
- Tounekti, T., Mahdhi, M., Al-Turki, T. A., & Khemira, H. (2017). Genetic diversity analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) germplasm accessions growing in the Southwestern Saudi Arabia using quantitative traits. *Natural Resources*, 08(05), 321-336. <https://doi.org/10.4236/nr.2017.85020>
- Tounekti, T., Mahdhi, M., Al-Turki, T. A., & Khemira, H. (2018). Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. *South African Journal of Botany*, 117, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.04.022>
- Unigarro M., C. A., Medina R., R. D., & Florez R., C. P. (2017). *Relación entre producción y características fenotípicas en coffea Arabica L.* <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/816>
- USDA-FAS (United States Department of Agriculture—Foreign Agriculture Service) (2020). Peru: Coffee Annual. <https://www.fas.usda.gov/data/peru-coffee-annual-4>
- Vale, F. X. R. D., Parlevliet, J. E., & Zambolim, L. (2001). Concepts in plant disease resistance. *Fitopatologia Brasileira*, 26, 577-589. <https://doi.org/10.1590/S0100-41582001000300001>
- Valencia, A., Morales, A. Y., Moncada, M. del P., Cortina, H. A., & Herrera, J. C. (2017). Introgression of the SH3 gene resistant to rust (*Hemileia vastatrix*) in improved lines of Castillo variety (*Coffea arabica* L.). *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 9(8), 130-138. <https://doi.org/10.5897/JPBCS2017.0664>
- van der Vossen, H., Bertrand, B., & Charrier, A. (2015). Next generation variety development for sustainable production of arabica coffee (*Coffea arabica* L.): A review. *Euphytica*, 204(2), 243-256. <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1398-z>
- Vanderplank, J. E. (2012). *Disease resistance in plants*. Elsevier.
- Várzea, V. M. P., Marques, V. D., Pereira, A. P., & Silva, M. C. (2008). *The use of Sarchimor derivatives in coffee breeding resistance to leaf rust*. 14-19.
- Várzea, V. M. P., Marques, V. D., Pereira, A. P., & Silva, M. C. (2008). The use of Sarchimor derivatives in coffee breeding resistance to leaf rust. *In Proceedings of the 22nd International Conference on Coffee Science*, p. 14-19.
- Vasco, G. B., Pozza, E. A., Silva, M. G. da, Pozza, A. A. A., & Chaves, E. (2018). Interaction of K and B in the intensity of coffee rust in nutrient solution. *Coffee Science, Lavras*, 13(2), 238-244. <https://doi.org/10.25186/cs.v13i2.1428>

- Waller, J. M. (1982). Coffee rust—Epidemiology and control. *Crop Protection*, 1(4), 385-404. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(82\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0261-2194(82)90022-9)
- WeldeMichael, G. (2019). Character association and path coefficient analysis for yield and its related traits in Ethiopian coffee (*Coffea arabica* L.) accessions. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences*, 5(3). <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0503003>
- Weldemichael, G., Alamerew, S., & Kufa, T. (2017). Genetic variability, heritability and genetic advance for quantitative traits in coffee (*Coffea arabica* L.) accessions in Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 12(21), 1824-1831.
- WeldeMichael, G., Alamerew, S., Kufa, T., & Benti, T. (2013). Genetic diversity analysis of some Ethiopian specialty coffee (*Coffea arabica* L.) germplasm accessions based on morphological traits. *Time Journals of Agriculture and Veterinary Sciences*, 1(4), 47-54.
- Willocquet, L., Savary, S., & Yuen, J. (2017). Multiscale phenotyping and decision strategies in breeding for resistance. *Trends in Plant Science*, 22(5), 420-432. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.01.009>
- Yan, W., & Rajcan, I. (2002). Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science*, 42(1), 11-20. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1100>
- Zafar-Pashanezhad, M., Shahbazi, E., Golkar, P., & Shiran, B. (2020). Genetic variation of *Eruca sativa* L. genotypes revealed by agro-morphological traits and ISSR molecular markers. *Industrial Crops and Products*, 145, 111992. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111992>
- Zambolim, L. (2016). Current status and management of coffee leaf rust in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 41(1), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0065-9>
- Zambolim, L., & Caixeta, E. T. (2021). An overview of physiological specialization of coffee leaf rust: New designation of pathotypes. *International Journal of Current Research*, 13(1), 15564-15575. <https://doi.org/10.24941/ijcr.40600.01.2021>
- Zambolim, L., de Souza Neto, P. N., Zambolim, E. M., Caixeta, E. T., Sakiyama, N. S., & Ferrão, R. G. (2016). Components of resistance of conilon coffee that reduce the rate of leaf rust development. *Australasian Plant Pathology*, 45(4), 389-400.
- Zambolim, L., Pereira, A. A., Sakiyama, N. S., & Barros, U. V. (2000). Resistência genética e componentes de resistência de linhagens de catimor em gerações F6 e F7 à raças de *Hemileia vastatrix* Berk. Et. Br. In: *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil* (1.: 2000:

Poços de Caldas, MG). Resumos expandidos. Brasília, D.F.: Embrapa café; Belo Horizonte: Minasplan, 2000. 2v. (1490p.), p. 507-514.

Zhang, D., Vega, F. E., Solano, W., Su, F., Infante, F., & Meinhardt, L. W. (2021). Selecting a core set of nuclear SNP markers for molecular characterization of arabica coffee (*Coffea arabica* L.) genetic resources. *Conservation Genetics Resources*, 13(3), 329-335. <https://doi.org/10.1007/s12686-021-01201-y>

ANEXO

Tabla 12. Registros climáticos de la Colección de germoplasma de *C. arabica* del INIA durante el estudio, temperatura (T°) (mínima, máxima y promedio), humedad relativa (HR) y precipitación (mm).

| Año | Mes | Temperatura (°C) | | | HR (%) | Precipitación (mm) | Fase Fenológica |
|------|-----------|------------------|----------|-----------|--------|--------------------|------------------|
| | | T max °C | T min °C | T Prom °C | | | |
| 2020 | Enero | 31,99 | 21,71 | 26,85 | 80,68 | 303,20 | Llenado de grano |
| | Febrero | 30,88 | 21,79 | 26,34 | 83,63 | 330,80 | Llenado de grano |
| | Marzo | 32,53 | 21,53 | 27,03 | 79,21 | 144,80 | Cosecha |
| | Abril | 31,93 | 21,43 | 26,68 | 79,73 | 147,80 | Cosecha |
| | Mayo | 32,14 | 20,74 | 26,44 | 78,85 | 130,60 | Cosecha |
| | Junio | 33,22 | 19,96 | 26,59 | 73,28 | 35,00 | Descanso |
| | Julio | 32,50 | 19,55 | 26,02 | 72,94 | 22,20 | Floración |
| | Agosto | 34,20 | 19,45 | 26,83 | 66,60 | 9,10 | Floración |
| | Setiembre | 33,98 | 20,17 | 27,07 | 69,88 | 44,90 | Floración |
| | Octubre | 34,05 | 20,25 | 27,15 | 69,69 | 61,60 | Llenado de grano |
| | Noviembre | 33,96 | 21,23 | 27,60 | 70,13 | 107,70 | Llenado de grano |
| | Diciembre | 30,62 | 21,05 | 25,83 | 79,04 | 251,90 | Llenado de grano |
| 2021 | Enero | 31,07 | 20,77 | 25,92 | 78,43 | 158,70 | Llenado de grano |
| | Febrero | 31,97 | 21,41 | 26,69 | 78,95 | 156,30 | Llenado de grano |
| | Marzo | 32,06 | 20,55 | 26,31 | 77,72 | 150,30 | Cosecha |
| | Abril | 32,10 | 20,63 | 26,37 | 77,57 | 162,80 | Cosecha |
| | Mayo | 32,42 | 19,89 | 26,15 | 73,82 | 16,70 | Cosecha |
| | Junio | 31,41 | 19,08 | 25,25 | 74,88 | 30,30 | Descanso |
| | Julio | 32,39 | 18,23 | 25,31 | 69,77 | 38,50 | Floración |
| | Agosto | 33,54 | 19,03 | 26,29 | 69,76 | 55,70 | Floración |
| | Setiembre | 33,57 | 19,92 | 26,74 | 72,39 | 105,90 | Floración |
| | Octubre | 34,51 | 21,00 | 27,75 | 70,00 | 108,80 | Llenado de grano |
| | Noviembre | 31,10 | 21,13 | 26,11 | 79,47 | 327,10 | Llenado de grano |
| | Diciembre | 32,00 | 21,55 | 26,78 | 77,88 | 176,70 | Llenado de grano |

Tabla 13. Número promedio de lesiones generadas por la inoculación artificial con de *H. vastatrix* en accesiones y cultivares de *C. arabica*, según el grado de severidad (Sev) evaluadas en el laboratorio de Fitopatología de la EEA Pichanaki, INIA.

| Accesión/ Cultivar | Grados de severidad / Número promedio de lesiones | | | | | |
|-----------------------|---|------|-------|------|------|-------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | 1,00 | 0,00 | 9,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 26 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 27 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 28 | 0,33 | 0,00 | 6,33 | 3,33 | 0,00 | 0,00 |
| 29 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 32 | 0,00 | 0,00 | 4,33 | 3,67 | 1,00 | 1,00 |
| 37 | 0,00 | 0,00 | 4,67 | 3,00 | 2,00 | 0,33 |
| 38 | 0,00 | 0,00 | 1,67 | 6,00 | 0,33 | 2,00 |
| 41 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,33 | 2,67 | 7,00 |
| 46 | 0,50 | 0,00 | 9,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 47 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 52 | 0,00 | 0,00 | 7,33 | 2,67 | 0,00 | 0,00 |
| 53 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 54 | 0,00 | 0,00 | 8,00 | 0,00 | 2,00 | 0,00 |
| 62 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 63 | 0,00 | 0,00 | 3,33 | 0,00 | 3,33 | 3,33 |
| 68 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 10,00 |
| 102 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 10,00 |
| 110 | 1,00 | 0,00 | 9,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 117 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 134 | 0,33 | 0,00 | 9,67 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 199 | 0,00 | 0,00 | 6,33 | 2,00 | 0,33 | 1,33 |
| 203 | 0,33 | 0,00 | 9,67 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 205 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Canf_1 | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Canf_2 | 0,00 | 0,33 | 0,33 | 7,67 | 1,00 | 0,67 |
| Canf_a | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cat | 0,00 | 0,00 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Catu_1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 10,00 |
| Catu_2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 10,00 |
| Catu_3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 10,00 |
| Catu_a | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H1 | 0,00 | 0,00 | 8,67 | 1,33 | 0,00 | 0,00 |
| Mars | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 10,00 |



Figura 7. Colecta de uredosporas *H. vastatrix* en hojas de café. (A) Selección de hojas lesionada sin daño mecánico o por patógenos. (B) Tipo de hojas colectadas.



Figura 8. Multiplicación de uredosporas de *H. vastatrix*. (A) Raspada y depósito de inóculo en vaso con 100 mL de agua destilada. (B) Aplicación de la suspensión en la superficie inferior de las hojas de café var. Caturra. (C) Simulación de cámara húmeda en plantas inoculadas. (D y E) Hojas con lesiones cloróticas cubiertas de uredosporas 60 días después de la inoculación.



Accesión 203

Accesión 46

Accesión 53

Accesión 12

Figura 9. Accesiones de *C. arabica* resistentes y susceptibles a *H. vastarix* correspondientes a la colección de germoplasma del INIA.

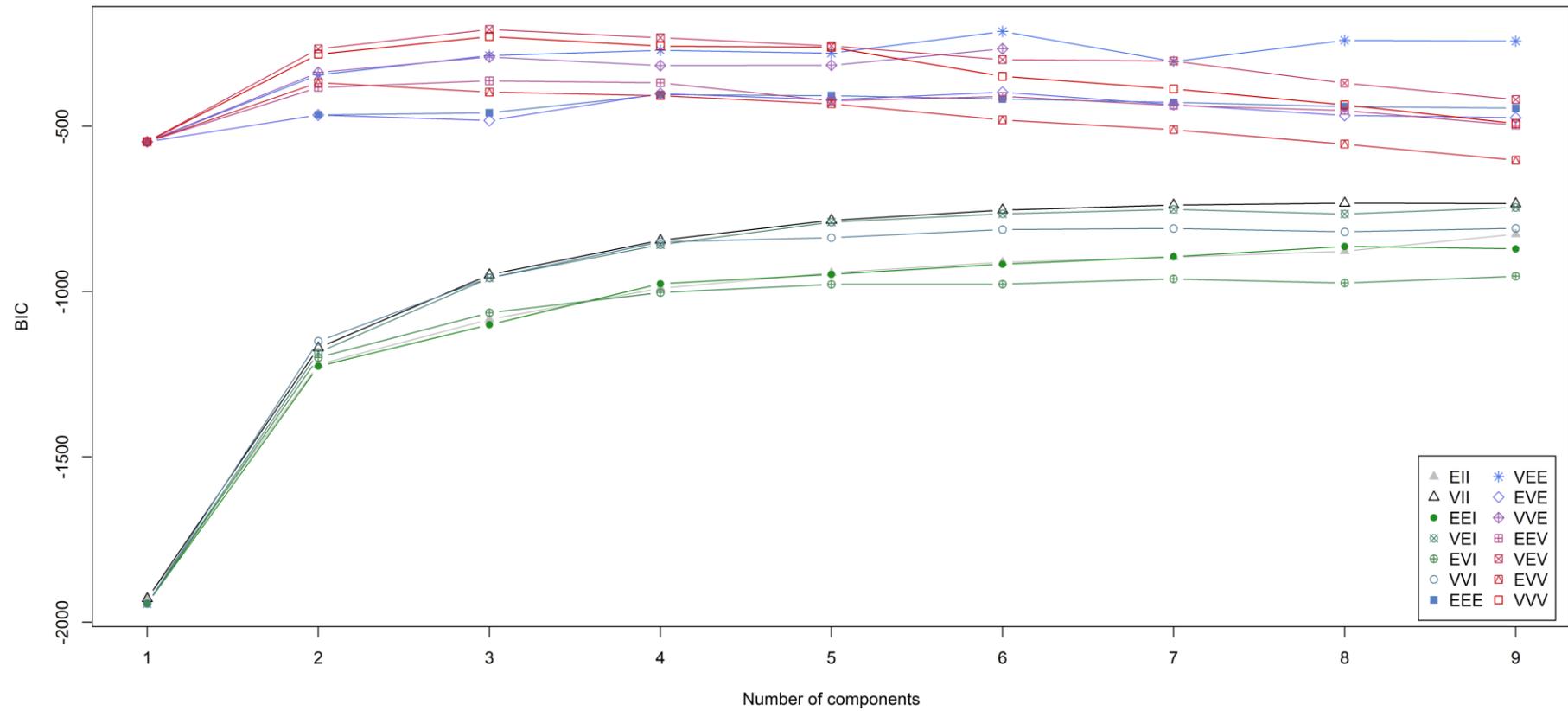


Figura 10. Selección del modelo y número de componentes para el agrupamiento mediante el criterio de información Bayesiana (BIC), usando n el paquete “Mclust” en el software estadístico R.

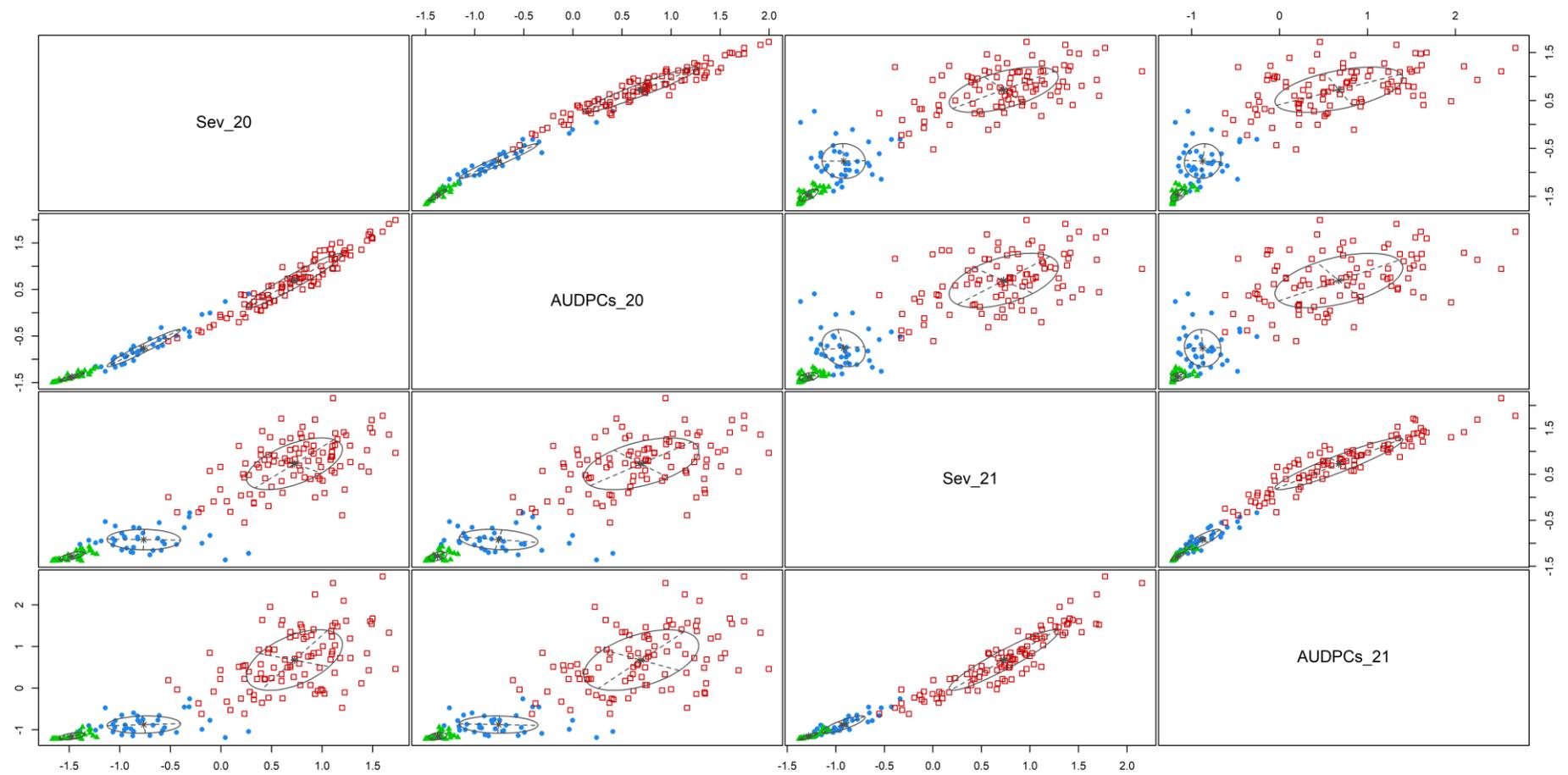


Figura 11. Método de agrupamiento usando la variable índice de la enfermedad (IE) y área bajo la curva de progreso de la enfermedad (ABCPE) para los ciclos epidemiológicos 2019-2020 y 2020-2021, evaluados en 168 accesiones de *C. arabica* de la colección de germoplasma del INIA.