

Selección de árboles élitos de cacao (*Theobroma cacao* L.) para la conservación de la biodiversidad y mejora de la productividad cacaotera del departamento de Nariño

Selection of elite cacao (*Theobroma cacao* L.) trees for biodiversity conservation and cacao productivity enhancement in the department of Nariño

José Ives Pérez-Zuñiga¹, Beto Alonso Moreno Caicedo², Cristian Camilo Ortiz², Karen Andrea Alarcón²,
Jaydy Segura Estupiñán², Manfred Palacio²

¹ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Palmira, Sede Popayán, Popayán, Cauca, Colombia.

² Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación El Mira, Tumaco, Nariño, Colombia.

Resumen

La investigación se desarrolló en el departamento de Nariño en dos zonas pacífica y de cordillera correspondiente a los municipios de Tumaco y Los Andes respectivamente. El objetivo general fue caracterizar morfo-agronómica árboles regionales de cacao (*Theobroma cacao* L.) identificados por los productores con la finalidad de seleccionar materiales élitos que pueden ser utilizados por los productores en la conservación de la diversidad, mejorar calidad y aumentar producción de grano de cacao. Se seleccionaron 23 árboles de cacao (*Theobroma cacao* L.) a través de la metodología de índice de selección, utilizando variables de fruto, incidencia a enfermedades y variables agronómicas, lo cual permitió identificar y seleccionar árboles que presentaron en promedio 199 frutos sanos por año, índice de grano de 2,21, índice de mazorca de 10, incidencia *Moniliophthora roreri* menor al 8% y mazorca negra *Phytophthora palmivora* L. menor a 1%.

Palabras clave: *Theobroma cacao*; recurso genético, caracterización germoplasma, mejoramiento plantas.

Abstract

The research was carried out in the department of Nariño in two zones, Pacific and Cordillera, corresponding to the municipalities of Tumaco and Los Andes, respectively. The general objective was to characterize morpho-agronomically regional cacao trees (*Theobroma cacao* L.) identified by producers in order to select elite materials that can be used by producers in the conservation of diversity, improve quality and increase cocoa bean production. Twenty-three cocoa trees (*Theobroma cacao* L.) were selected through the selection index methodology, using fruit variables, disease incidence and agronomic variables, which allowed the identification and selection of trees with an average of 199 healthy fruits per year, bean index of 2.21, pod index of 10, *Moniliophthora roreri* incidence of less than 8% and black pod *Phytophthora palmivora* L. of less than 1%.

Key words: *Theobroma cacao* L., genetic resources, germplasm characterization, genetic variability, plant breeding.

Para citar este artículo: Pérez Zúñiga, J.I., Moreno Caicedo, B.A., Ortiz Díaz, C.C., Alarcón Beltrán, K.A., Segura Estupiñán, J. & Palacio, M. (2025). Selección de árboles élitos de cacao (*Theobroma cacao* L.) para la conservación de la biodiversidad y mejora de la productividad cacaotera del departamento de Nariño. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 26(1), e4391. https://doi.org/10.21930/rcta.vol26_num1_art:4391

Introducción

Colombia posee una gran diversidad de cacao debido a que este país hace parte del centro de origen de la especie (Motamayor et al., 2008) y a la historia de su cultivo (Barros N., 1981) lo cual se corrobora con análisis genéticos realizados a las accesiones colectadas que se conservan en el banco de germoplasma de la nación (Osorio-Guarín et al., 2017; Sánchez et al., 2007); las primeras colecciones de cacao en el país datan del año 1943 donde se registraron 172 materiales (Fedecacao & Corpoica, 2009), a partir de estas se ha continuado realizando esfuerzos por diferentes instituciones del orden nacional y departamental para realizar caracterización, selección y colecta de materiales para su conservación e incluso registrar nuevos cultivares para comercialización dentro del territorio nacional (Agudelo-Castañeda et al., 2023; Ballesteros P., 2011; Gil et al., 2024; López-Hernández et al., 2021; Ospino et al., 2020).

Y es que la cadena del cacao y su agroindustria es una importante fuente de empleo en Colombia, para el año 2020 generó cerca de 173.293 empleos, entre directos e indirectos teniendo presente que este se cultiva en 29 departamentos (UPRA, 2023) y se estima que el país cuenta con 16.750.716 hectáreas aptas para el cultivo de cacao, que equivalen al 42,7% de la frontera agrícola nacional de las cuales 7.277.688 hectáreas están clasificadas con aptitud (A1) (USAID, 2022).

La importancia de las colectas de cacao en Colombia radican en que el 80% del grano que se produce y comercializa tiene la calificación de finos de sabor y aroma (Follana, 2024), y de acuerdo a expertos la calidad final de un grano depende de los siguientes factores: 50 % genética del cacao, 20% post cosecha o proceso de beneficio, 25 % transformación (tostado y conchado) y 5 % suelo y estación (Cambrai et al., 2010; Gutiérrez S., 2007; Kongor et al., 2016), el origen geográfico afecta el perfil químico relacionado con compuestos bioactivos, composición mineral e ácidos orgánicos (Panda et al., 2022)

El departamento de Nariño ocupa el sexto lugar en producción de cacao en Colombia (UPRA, 2023) se cultivan alrededor de 18.737 hectáreas y posee un área de 185,504 hectáreas aptas para su cultivo donde alrededor de 1.200 familias derivan su sustento de este grano siendo con el 95% de la producción el municipio de Tumaco el principal productor y es precisamente en esta región donde se han identificado sabores y aromas únicos y distintivos que les han merecido premios a nivel nacional e internacional (Chaux & Pérez, 2017; CIAT, 2011b; Gobernación de Nariño, 2024; Rojas et al., 2021) el cual proviene principalmente de plantaciones híbridas de cruce naturales con alta heterogeneidad (Delgadillo-Duran et al., 2024; Ruiz E., 2014) por lo que es prioridad en el departamento de Nariño conservar los

materiales regionales (Corporación para el desarrollo agroempresarial de Tumaco, 2009; USAID, 2022). En este sentido ya se han realizado algunos trabajos (Ballesteros P., 2011; Escobar T., 2008) utilizando diferentes metodologías que han permitido la identificación y caracterización de árboles regionales, sin embargo, no se ha continuado con el trabajo de conservación, evaluación y propagación.

Para realizar caracterización de árboles sobresalientes de cacao se han descrito diferentes metodologías incluso con participación activa de los agricultores siendo su experiencia el insumo más importante para el éxito de un programa de mejoramiento productivo del cacao (Arguello C. et al., 1999; Avendaño-Arrazate et al., 2013; Compañía Nacional de Chocolates, 2018; González et al., 2014; Palencia C. et al., 2008), continuando la selección con la utilización simultánea de varios caracteres ponderando cada uno de ellos con un peso relativo, a causa de su importancia económica (Cordine et al., 1985) metodología denominada índice de selección (Baker, 1986; Lagos-Burbano, 2023; Rahimi & Debnath, 2023; Setyawan & Mitrowihardjo, 2016), el cual se ha sido empleado como herramienta para seleccionar materiales por rendimiento y reacción a enfermedades principalmente (Jaimez et al., 2020). El objetivo de este trabajo fue caracterizar y seleccionar árboles de cacao sobresalientes en finca de productor para conservar su biodiversidad aptos para ser evaluados ex sitú y luego propagar en sistemas de siembras comerciales en el departamento de Nariño.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en fincas de cacaocultores tradicionales ubicados en veredas de los municipios de Tumaco y Los Andes en el departamento de Nariño, los cuales presentan condiciones contrastantes en cuanto oferta agroambiental ya que el primer municipio se ubica en el bioma Zonobioma húmedo tropical del Pacífico y haolobioma del pacifico y el segundo municipio al orobioma bajo de los andes (IGAC, 2024), igualmente se incluyó en la investigación arboles de cacao identificados en otros trabajos de prospección realizadas en la región de Tumaco (Ballesteros P., 2011; Escobar T., 2008).

La inscripción inicial de los árboles de cacao se hizo a partir de listados enviados por organizaciones o lideres comunitarios de cada región, llegando a un total 727 de estos 704 se ubicaban en el municipio de Tumaco y 23 en el municipio de Los Andes. Posteriormente se realizó verificación de los árboles siguiendo la metodología descrita por (Palencia C. et al., 2008) donde se tuvieron en cuenta criterios como que el árbol no estuviera al borde del lote, distanciado al menos 50 metros del cauce de un río o quebrada, a 20 metros del hogar del productor, que estuviera en competencia con otros árboles de cacao, mínimo a 30 metros de un

depósito de desechos orgánicos y que sea un árbol vigoroso de más de 20 años de edad; con las consideraciones anteriores se preseleccionaron un total de 250 árboles los cuales fueron ubicados en forma satelital. Participativamente con los productores se definió las características de interés a registrar dado que los materiales de la región se los considera que son de buena calidad organoléptica es así que durante 14 meses se les registro mazorcas sanas (MS), incidencia *Moniliophthora roreri* (IM), incidencia *Phytophthora palmivora* (IP) número de escobas *Moniliophthora perniciosa* (NE) en cojines florales; al finalizar este periodo los árboles que hubiesen tenido al menos 60 frutos sanos se le evaluó por única vez largo mazorcas (LM) y ancho de mazorcas (AM), espesor de la cascara (ECM), número de granos (NGM), se registró el largo semillas (LS) y ancho de las semillas (AS) se determinó índice de mazorca (IndM) e índice de grano (IndG) (Arguello C. et al., 1999)

No se utilizó un diseño experimental debido a la naturaleza del trabajo de tipo exploratorio con un solo individuo o árbol por material genético. Para utilizar la metodología de índice de selección, los pesos económicos se asignaron a las variables: mazorcas sanas (MS), incidencia *Moniliophthora roreri* (IM), incidencia *Phytophthora palmivora* (IP) número de escobas *Moniliophthora perniciosa* (NE) en cojines florales, número de granos (NGM), índice de mazorca (IndM) e índice de grano (IndG) las cuales fueron seleccionadas en conjunto con líderes de la zona conocedores del cultivo, dando valores positivos a las variables que el productor considera deseables y negativo a las que no, para facilitar la interpretación la suma de los pesos asignados se normalizó a 1 o -1 esto no afecta el ranking de selección por ser una combinación lineal (Baker, 1986).

En las variables seleccionadas por ser unidades de medida diferentes los datos se estandarizaron mediante la fórmula:

$$Z_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde

Z_i = valor estandarizado de la variable de interes,

μ_i = media,

X_i = variable de interés

σ = desviación estándar de la variable X_i

El índice se calculó mediante la fórmula:

$$I = a_1Z_1 + a_2Z_2 + a_3Z_3 \dots \dots a_pZ_p \text{ (Ecuación 2)}$$

donde

I = índice de selección,

a = peso económico y

Z variable de interés estandarizada.

Los genotipos o plantas con los valores más altos de I son los mejores candidatos para la selección.

Análisis datos

La información recopilada en el proceso de evaluación de los árboles de cacao se almaceno en una matriz, luego se aplicó análisis de componentes principales (ACP) con el objetivo de evaluar la variabilidad de los elementos los análisis estadísticos se realizaron con el software R versión 3.6.3 (R Core Team, 2025) y se usó el paquete de análisis estadístico FactorMineR versión 2.11 (Lê S, Josse J et al, 2008). La construcción del mapa de distribución de los árboles de cacao se realizó con el Software DIVA-GIS 7.5.0.0

Resultados

Un total de 42 árboles de cacao establecidos en finca de productor obtuvieron igual o más de 60 frutos sanos en el periodo de evaluación los cuales se ubicaron en el municipio de Tumaco (Figura 1) no reportándose para el municipio de los Andes debido a que ocurrió un fuerte ataque de ardilla dañando los frutos cerca de su maduración, vertebrado ya reconocido como causante de pérdidas de producción de cacao en Colombia (López-Ramírez et al., 2020). Los promedios de las variables evaluadas obtenidos fueron: mazorcas sanas $192,2 \text{ cm} \pm 130,2$; largo de la mazorca $19,0 \pm 2,9$; ancho de la mazorca $9,0 \text{ cm} \pm 0,5$; espesor de la cascara $1,3 \pm 0,7$; número de granos por mazorca $38,5 \pm 4,8$; largo de grano $2,5 \text{ cm} \pm 0,2$; ancho de grano $1,3 \pm 0,2$; incidencia de *Moniliophthora roreri* $12,7\% \pm 10,9$; Incidencia *Phytophthora palmivora* $1,6\% \pm 2,8$; número de escobas de bruja (*Moniliophthora perniciosa*) $9,6 \pm 14,3$; índice de mazorca $19,1 \pm 4,0$ e índice de grano $1,4 \pm 0,3$ (Tabla 1)

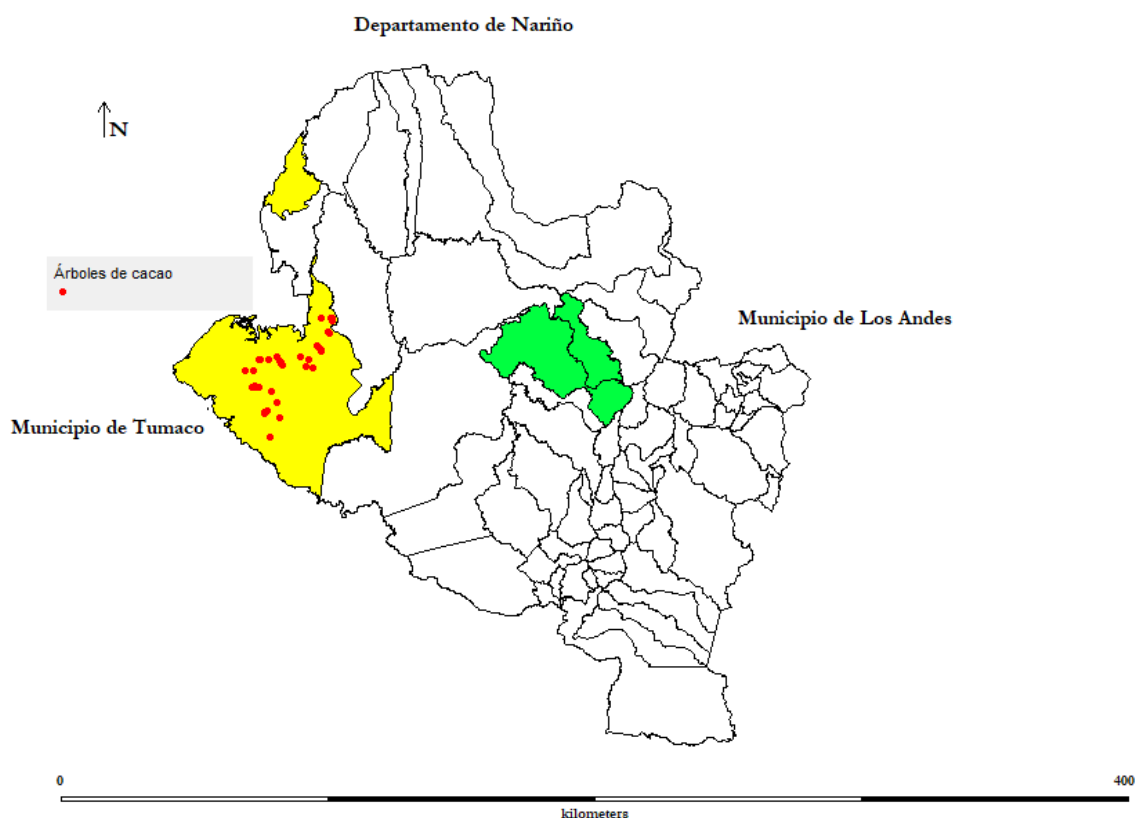


Figura 1. Ubicación de árboles de cacao preseleccionados en el departamento de Nariño, suroccidente de Colombia. Los límites nacionales, departamentales y distritales se obtuvieron del geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi en formato shapefile. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Medidas estadísticas resumen de variables evaluadas en árboles elite de cacao preseleccionado en el departamento de Nariño.

Variable	Media	D.E.	CV	Min	Max
Mazorcas sanas (MS)	192,2	130,2	67,7	60,0	494,0
Largo de la mazorca (LM)	19,0	2,9	15,5	14,1	25,0
Ancho de la mazorca (AM)	9,0	0,5	5,9	7,8	10,0
Espesor cascara mazorca (ECM)	1,3	0,7	54,2	0,7	5,1
Numero de granos por mazorca (NGM)	38,5	4,8	12,4	27,3	50,5
Largo de la semilla (LS)	2,5	0,2	9,3	1,8	2,9
Ancho de la semilla (AS)	1,3	0,2	11,2	1,00	1,6
Incidencia <i>Moniliophthora roreri</i> (IM)	12,7	10,9	86,2	0,0	45,9
Incidencia <i>Phytophthora palmivora</i> (IP)	1,6	2,8	171,3	0,0	12,6
Numero <i>Moniliophthora perniciosa</i> (NE)	9,6	14,3	148,6	0,0	71,0
Índice de grano (IndG)	1,4	0,3	22,3	1,0	2,2
Índice de mazorca (IndM)	19,1	4,0	20,9	10,4	27,6

Nota: D.E: desviación estándar, C.V.: coeficiente de variación, Min: Mínimo, Max: máximo. Fuente: Elaboración propia

Varios de los coeficientes de variación calculados en esta evaluación fueron altos lo cual se puede atribuir a la variación natural del cacao presente en las fincas de productor y a que los datos recolectados fueron en condiciones no experimentales, por lo que pueden considerarse aceptables (Okabe et al., 2004) y concuerda con un estudio realizado en Brasil evaluando clones de cacao (da Silva G. et al., 2022)

Los resultados del análisis de componentes principales (ACP) para todas las variables en estudio se presentan en la Tabla 2, donde se aprecia que tres dimensiones logran explicar el 57% de la varianza total, para el caso de la dimensión uno (1) la variable que más contribuye corresponde al índice de mazorca (IndM) con un 22,65% y la que menos el número de escobas (NE) con 0,45%, en el caso de la dimensión dos (2) la variable que más aporta a la varianza corresponde a incidencia de *Moniliophthora roreri* (IM) con 29,60% y la que menos índice de mazorca (IndM) con 0% y en la dimensión tres (3) la variable con más aporte a la varianza es el número de granos por mazorca (NGM) con 40,16% y la de menor contribución mazorcas sanas con 0,43%.

En la figura 2 se disponen las variables y árboles de cacao evaluados teniendo presente las tres dimensiones que más aportan a la varianza total, donde el vector de color naranja y de mayor longitud indica una mayor variabilidad, y un vector con color azul y corto sugieren una menor variabilidad. Y a su vez, vectores en el mismo cuadrante o en cuadrantes opuestos sugieren una correlación positiva o negativa respectivamente, observándose que las variables permiten identificar diferencias entre los materiales de cacao evaluados ya que se pueden identificar agrupaciones.

Tabla 2. Variabilidad total con datos asociados a 12 variables relacionadas en la selección de árboles sobresalientes de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante análisis de componentes principales y contribuciones de correlaciones en las dimensiones 1, 2 y 3.

Dimensión	Valor	Varianza explicada (%)	Varianza acumulada (%)
1	3,38	28,16	28,16
2	1,93	16,07	44,23
3	1,61	13,47	57,70

Variable	Dim.1	Contribución %	Dim.2	Contribución %	Dim.3	Contribución %
IM	0,18	0,97	0,76	29,60	0,19	2,15
IP	0,18	0,98	0,65	21,99	0,23	3,40
NE	0,12	0,45	0,48	11,86	0,48	14,26
MS	0,25	1,85	-0,65	22,05	0,08	0,43
LM	0,66	12,73	-0,04	0,10	-0,36	8,10
AM	0,69	14,27	0,29	4,49	-0,23	3,35
ECM	0,37	4,06	0,15	1,19	-0,43	11,64
NGM	-0,11	0,35	0,27	3,89	-0,81	40,16
LS	0,73	15,86	-0,17	1,54	0,29	5,29
AS	0,42	5,20	-0,17	1,46	0,10	0,66
IndG	0,84	20,65	-0,19	1,84	0,33	6,74
IndM	-0,88	22,65	-0,00	0,00	0,25	3,82

Nota. MS: mazorcas sanas, IM: incidencia *Moniliophthora roreri*, IP: incidencia *Phytophthora palmivora*, NE: número de escobas *Moniliophthora perniciosa*, LM: largo mazorcas, AM: ancho de mazorcas, ECM: espesor de la cascara, NGM: número de granos, LS: largo semillas, AS: ancho de semillas, IndM: índice de mazorca e IndG: índice de grano. Fuente: Elaboración propia.

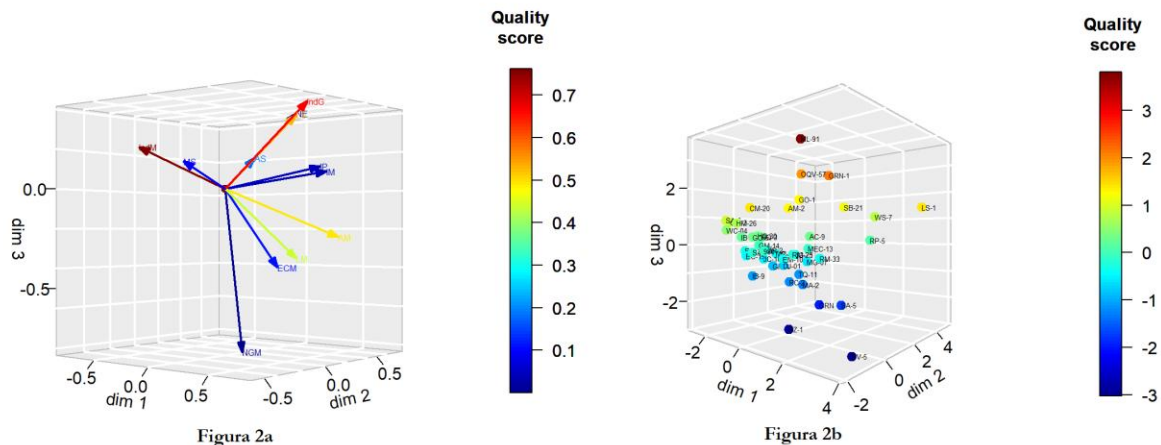


Figura 2. Peso relativo de las dimensiones 1, 2 y 3 (2A) se incluye todas las variables evaluadas y (2B) el aporte de los árboles de cacao evaluados a la varianza total.
Fuente: Elaboración propia

El análisis de las variables de interés seleccionadas por los productores a través de la metodología de componentes principales se presenta en la Tabla 3, identificando tres dimensiones que logran explicar el 71,58% de la varianza total, en la dimensión

uno (1) la variable que más contribuye corresponde al índice de grano (IndG) con un 27,28% y la que menos la cantidad de mazorcas sanas (MS) con 0,04%, para la dimensión dos (2) la variable que más aporta a la varianza corresponde a mazorcas sanas (MS) con 28,73% y la variable con menos aporte número de escobas (NE) con 6,76%, en la dimensión tres (3) la variable con más aporte a la varianza es el número de granos por mazorca (NGM) con 55,22%, observándose que las variables de interés permiten generar agrupaciones de los materiales de cacao (figura 3).

Tabla 3. Variabilidad total con datos asociados a 7 variables seleccionadas por los productores en la selección de árboles sobresalientes de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante análisis de componentes principales y contribuciones de correlaciones en las dimensiones 1, 2 y 3

Dimensión	Valor	Varianza explicada (%)		Varianza acumulada (%)	
1	1,90	27,15		27,15	
2	1,82	26,03		53,17	
3	1,29	18,41		71,58	

Variable	Dim.1	Contribución %	Dim.2	Contribución %	Dim.3	Contribución %
IM	0,58	17,57	0,56	17,24	0,01	0,01
IP	0,64	21,80	0,42	9,77	0,01	0,01
NE	0,47	11,49	0,35	6,76	0,32	8,14
MS	-0,03	0,04	-0,72	28,73	0,08	0,52
NGM	-0,27	3,96	0,37	7,65	-0,84	55,22
IndG	0,72	27,28	-0,63	22,10	0,01	0,01
IndM	-0,58	17,87	0,38	7,76	0,68	36,10

Nota. IM: incidencia *Moniliophthora roreri*, IP: incidencia *Phytophthora palmivora*, NE: número de escobas *Moniliophthora perniciosa*, MS: mazorcas sanas, NGM: número de granos, IndG: índice de grano e IndM: índice de mazorca. Fuente: Elaboración propia

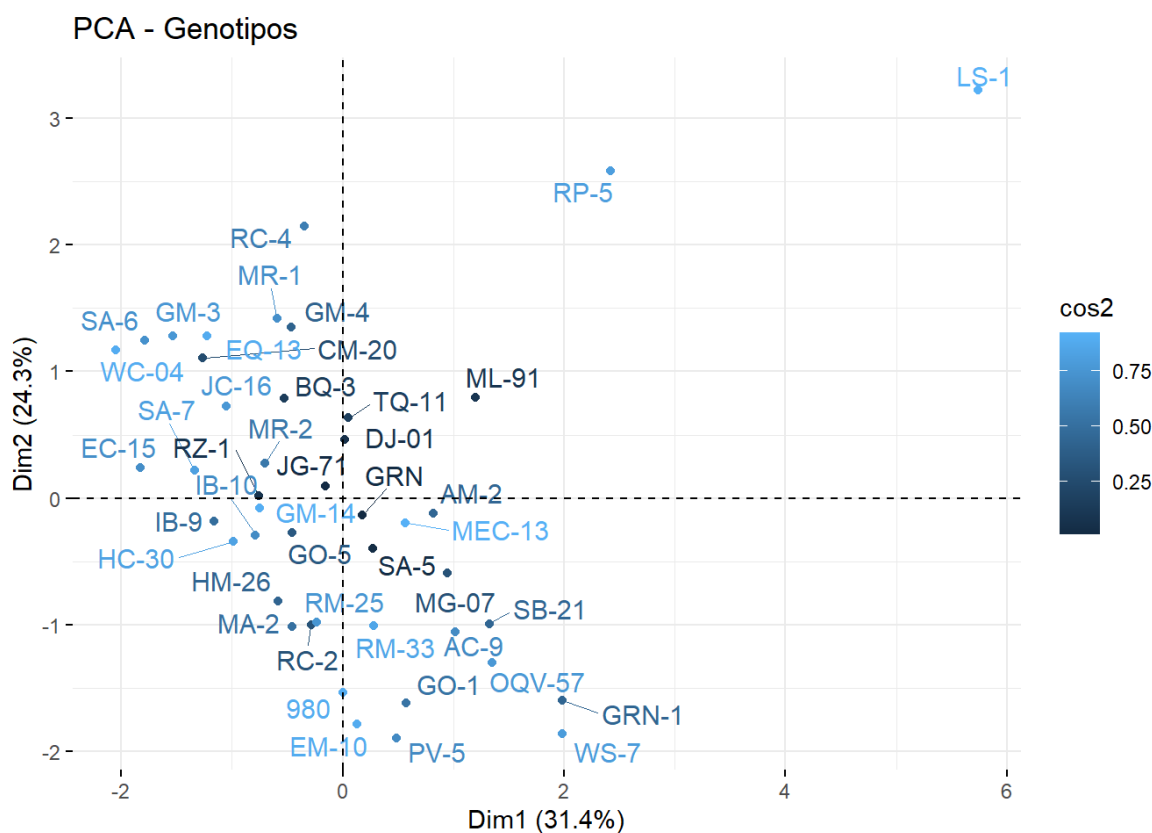


Figura 3. Agrupación de materiales de cacao en evaluación teniendo presente las variables seleccionadas por los productores con la metodología de componentes principales. Fuente: Elaboración propia

Una vez definidos participativamente con los productores los pesos económicos para las variables de interés y estandarizados para que la suma sea 1 para los positivos y -1 para los negativos se obtuvieron los valores de MS: 0,42, IM: -0,26, IP: -0,22, NE: -0,18, IndM: -0,34, IndG: 0,25 y NGM: 0,33 con estos se procedió a calcular el índice de selección (I). En la Tabla 4, se puede observar los 23 árboles de cacao que presentaron índice de selección con valor positivo donde observan materiales de cacao con una producción alta de mazorcas sanas superior a 400 unidades en el periodo evaluado en los árboles con código A980, OQV-57, GO-1, IB-10, GO-5 y SA-7 igualmente baja incidencia de *Moniliophthora roreri* una de las principales enfermedades que se presenta en plantaciones de cacao en el pacífico con incidencia < 5% en los materiales A980, IB-9, HM-26 y RM-25, también se identificaron árboles de cacao con índice de mazorca < 15 como PV-5, WS-7, EM-10 y SA-5 y del material seleccionado el 86% presenta un índice de grano superior al 1,1 superando el valor que indica la norma colombiana NTC 1252 (ICONTEC, 2003) entre otras características de interés.

Tabla 4. Árboles de cacao seleccionados por metodología índice de selección con sus principales características evaluadas en el departamento de Nariño

	MS		IM		IP		NE		IndM		IndG		NGM	
Peso económico	0,42		-0,26		-0,22		-0,18		-0,34		0,25		0,33	
Código árbol	MS	IM	IP	NE	LM	AM	EC	NGM	LS	AS	IndM	IndG	I*	
A980	439	4%	1%	0	22,2	8,4	0,9	40,1	2,6	1,4	15,4	1,6	1,78	
PV-5	235	6%	0%	6	22,0	9,4	5,1	44,1	2,6	1,3	13,1	1,7	1,63	
OQV-57	494	20%	3%	7	20,8	8,7	0,7	33,1	2,8	1,6	15,9	1,9	1,25	
GO-1	457	6%	0%	6	20,9	9,6	1,3	30,6	2,7	1,5	17,5	1,9	1,11	
IB-10	430	7%	0%	2	16,0	8,4	0,8	40,7	2,6	1,4	19,1	1,3	1,10	
RC-2	177	10%	0%	0	17,4	9,3	1,1	45,1	2,6	1,2	15,5	1,4	1,04	
WS-7	314	7%	3%	23	24,8	10,0	1,5	33,8	2,8	1,4	14,0	2,1	1,02	
EM-10	111	5%	0%	2	17,1	9,0	1,2	40,8	2,5	1,4	14,6	1,7	0,91	
GRN	263	23%	0%	7	22,6	9,7	1,4	45,8	2,5	1,1	16,1	1,4	0,89	
RZ-1	164	5%	2%	6	22,8	9,2	1,4	50,5	2,3	1,0	17,5	1,1	0,84	
AC-9	273	9%	5%	4	22,8	9,0	0,8	37,3	2,6	1,5	15,6	1,7	0,74	
IB-9	255	4%	1%	0	17,7	8,8	0,9	44,0	2,4	1,3	19,3	1,2	0,74	
GO-5	420	8%	1%	12	20,3	8,5	1,4	35,9	2,4	1,3	20,1	1,4	0,67	
HC-30	355	6%	1%	1	15,9	9,4	1,1	36,7	2,6	1,3	20,7	1,3	0,56	
SA-5	60	19%	0%	6	23,4	9,3	0,9	46,3	2,5	1,1	10,4	2,1	0,56	
MA-2	75	5%	0%	0	17,7	9,7	1,7	43,0	2,8	1,0	16,3	1,4	0,55	
SA-7	453	8%	1%	1	21,5	9,3	1,0	36,3	2,4	1,3	23,1	1,2	0,51	
HM-26	335	4%	0%	2	18,2	8,4	1,1	33,1	2,2	1,4	20,2	1,5	0,47	
MG-07	135	8%	8%	0	20,3	9,1	1,2	39,5	2,3	1,4	16,0	1,6	0,22	
RM-33	90	17%	0%	4	22,3	9,8	1,0	37,5	2,6	1,5	16,6	1,6	0,15	
MEC-13	214	15%	2%	13	21,4	9,3	1,2	37,7	2,5	1,3	17,7	1,5	0,11	
DJ-01	97	24%	2%	1	15,0	8,7	0,8	46,0	2,4	1,3	17,7	1,2	0,02	
RM-25	87	4%	0%	8	25,0	9,0	1,0	36,2	2,5	1,5	18,1	1,5	0,02	

Nota. MS: mazorcas sanas, IM: incidencia *Moniliophthora roreri*, IP: incidencia *Phytophthora palmivora*, NE: número de escobas *Moniliophthora perniciosa*, LM: largo mazorcas, AM: ancho de mazorcas, ECM: espesor de la cascara, NGM: número de granos, LS: largo semillas, AS: ancho de semillas, IndM: índice de mazorca e IndG: índice de grano, I: índice de selección. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

El presente estudio permite evidenciar que con 12 y hasta 7 variables se puede identificar variación en los materiales de cacao cultivados de forma tradicional en el municipio de Tumaco corroborando lo reportado en estudios de diversidad realizados con técnicas moleculares a través de Microsatelites RAMs (CIAT, 2011a) y SNPs (Delgadillo-Duran et al., 2024) y es que una de las variables evaluadas que más aportó a la varianza total fue el NGM (número de granos por mazorca) con 40,16% y 55,22% respectivamente en la tercer dimensión tanto con las variables totales evaluadas o las seleccionadas por los productores respectivamente, sin embargo, esto difiere en lo reportado por (Ballesteros P. et al., 2015) donde esta

variable aunque fue incluida en el estudio no tuvo ningún aporte para diferenciar árboles de cacao. FEDECACAO, (2021) menciona que para seleccionar árboles es aceptable más de 35 granos por mazorca e ideal más de 45 granos en este sentido mediante la metodología de índice de selección en este estudio de los 23 árboles seleccionados se identificaron 82,6% que superan los 35 granos por mazorca y 21,7% con más de 45 granos por mazorca variable correlacionada positivamente como componente del rendimiento del cultivo (Agudelo-Castañeda et al., 2023).

Para estimar el potencial del rendimiento del cultivo de cacao el índice de Mazorca (IndM) es una variable necesaria y se recomienda que su valor sea inferior a 17 como criterio para la selección de árboles sobresalientes de cacao (FEDECACAO, 2021), en esta investigación esta variable tuvo un aporte importante en la varianza total con 22,65% para diferenciar materiales cuando se tuvo en cuenta todas las variables y de 36,10% en las seleccionadas por los productores, lo cual concuerda con lo reportado por (Bekele et al., 2020) donde el índice de mazorca fue una de las variables que aportó a la diferenciación fenotípica de las accesiones de cacao evaluadas; de acuerdo al índice de selección de la presente investigación el 52% materiales identificados presento un valor menor a 17.

El índice de grano (IndG) contribuyo con el 20,65 y 27,28% de la variación teniendo presente todas las variables evaluadas y las seleccionadas por el productor respectivamente, este índice es considerado de interés en la norma técnica colombiana NTC 1252 ya que valores inferiores de 0,95 gramos se clasifica el cacao como corriente, en esta investigación el 100% de los árboles seleccionados presentan índices superiores a 1,1 gramos , mayores incluso a reportados en evaluación de híbridos de alto rendimiento en un trabajo realizado en Brasil cuyo rango estuvo entre 0,43 a 0,98 (Solís B. et al., 2015).

En cuanto a enfermedades incidencia de *Moniliophthora roreri* (IM) fue la que más aportó a la varianza con 29,60% teniendo presente todas las variables evaluadas, su aporte disminuyo a 17,57% cuando se solo se tuvo en cuenta las variables seleccionadas por los productores, el rango de incidencia natural registrado en los árboles de cacao seleccionados estuvo entre 4% y 24% resultado inferior en la selección de híbridos de cacao resistentes a *Moniliophthora roreri* en plena producción cuyos valores entre 10 % y 71% reportados por (Solís B. et al., 2015), y similares a los determinados por (Agudelo-Castañeda et al., 2023) en la selección de nuevas variedades de cacao para Colombia.

Para el caso de *Phytophthora palmivora* los árboles seleccionados presentan incidencia natural entre el 1% y 8% valores inferiores a los determinados por (Ramírez G., 2016) quien evaluando las pérdidas asociadas a esta enfermedad reporta valores hasta de

23%, sin embargo, la incidencia de las enfermedades se ve afectada por el sistema de cultivo implementado e incluso la especie acompañante ya que se genera un microclimas que favorecen o no el desarrollo del patógenos (Ramos et al., 2024), igualmente a la edad del cultivo y alta precipitación como lo determinó (Ramírez G., 2016), aunque implementando buenas prácticas de manejo cultural, se puede aumentar la productividad y disminuir la afectación por enfermedades en la producción cuando se cultiva bajo sistemas agroforestales en comparación con monocultivo (Armengot et al., 2020; ICA, 2012a)

El número de mazorcas sanas (MS), es una variable que representa el potencial productivo de un árbol y puede maximizar la ganancia en la selección por rendimiento (da Silva G. et al., 2022), en esta investigación su aporte varianza en la discriminación de grupos genéticos no fue importante en el análisis de todas las variables, sin embargo, en el análisis de las variables seleccionada por los productores su contribución fue del 28,73% cabe destacar que está variable fue la de mayor interés por los productores y a la que más peso económico se le otorgó.

(Agudelo-Castañeda et al.), 2023 menciona que el número de mazorcas sanas fue la que más contribuyo a la variación fenotípica dentro de los componentes de rendimiento. El rango de número de mazorcas sanas en esta investigación estuvo entre 60 que fue el número mínimo considerado para selección de árboles llegando hasta 494 mazorcas en el periodo de registro. Teniendo presente el índice de selección (I) más alto que corresponde al árbol con código A980 y el más bajo con código RM-25 el potencial de rendimiento a partir del cálculo $MS/IndM$ estaría entre 28,5 kg/árbol/año y 4,8 kg/árbol/año superando materiales de cacao seleccionados en Colombia por diferentes instituciones (FEDECACAO, 2021; Solís B. et al., 2015). El potencial del material seleccionado en esta investigación se debe corroborar en diferentes ambientes y por al menos cuatro años de acuerdo a lo indicado por (Cilas et al., 2023), tiempo mínimo de evaluación para determinar estabilidad en la producción de un árbol de cacao.

Conclusiones

En este estudio utilizando la metodología de índice de selección con participación de los productores mostro ser una herramienta eficaz que permitió combinar simultáneamente distintas variables de interés con lo cual se logró identificar y seleccionar 23 árboles de cacao de un total de 250 materiales en estudio lo que representa una selección de 9,2%, con características sobresalientes lo cual permite inferir la existencia de variabilidad genética en la región que se debe conservar dada la naturaleza híbrida predominante de los materiales cultivos en la región. Es de interés observar que en una zona de alta humedad y temperatura ambiente

propicio para el desarrollo de enfermedades se identificaron materiales con incidencia menor al 5% de *Moniliophthora roreri* siendo un recurso genético valioso para ser utilizados en programas de mejoramiento del cacao. Árboles con más de 400 mazorcas sanas por año e índice de mazorcas menores a 15 le permiten tener un potencial de producción de 26 kilos de grano seco por árbol. Se requiere por lo tanto ampliar la información de los materiales seleccionados a través de su evaluación ex situ en diferentes ambientes del departamento e incorporar otras variables relacionadas con manejo agronómico y de calidad y aroma.

Contribución de los autores

Conceptualización, J.I.P.-Z., J.S.; metodología, J.I.P.-Z., M.R.P, K.A.A., C.C.O., B.A.M.; análisis formal, J.I.P.-Z., M.R.P.; redacción (preparación del borrador original), J.I.P.-Z., M.R.P, B.A.M., C.C.O., K.A.A., J.S.; redacción (revisión y edición), J.I.P.-Z., M.R.P, B.A.M., C.C.O., K.A.A., J.S.; obtención de financiación, J.I.P.-Z. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito

Financiación

Este trabajo fue financiado por el Programa de Regalías del Ministerio de Ciencia y Tecnología e Innovación de Colombia bajo el acuerdo 44, firmado en noviembre de 2015, dentro del proyecto “Estudio para el Mejoramiento de la Productividad y Calidad Sensorial (Aroma y Sabor) del Cacao (*Theobroma cacao* L.)”

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Gobernación de Nariño y a las comunidades cacaoteras de los municipios de Tumaco y Los Andes en el departamento de Nariño, Colombia y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia.

Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento y quienes están de acuerdo son su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

Referencias bibliográficas

- Agudelo-Castañeda, G. A., Antolinez-Sandoval, E. Y., Báez-Daza, E. Y., Jaimes-Suárez, Y. Y., & Romero-Guerrero, G. A. (2023). Nuevas variedades de cacao seleccionadas en Colombia. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(3), 315-326. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3057>
- Arguello C., O., Contreras M., N., & Toloza O., J. A. (1999). *Manual caracterización morfoagronómica de clones elite de cacao en el Nororiente Colombiano*. CORPOICA. www.agronet.gov.co/www/.../Clones%20elite%20de%20cacao.pdf
- Armengot, L., Ferrari, L., Milz, J., Velásquez, F., Hohmann, P., & Schneider, M. (2020). Cacao agroforestry systems do not increase pest and disease incidence compared with monocultures under good cultural management practices. *Crop Protection*, 130(105047). <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105047>
- Avendaño-Arrazate, C. H., Mendoza-López, A., Hernández-Gómez, E., López-Guillén, G., Martínez-Bolaños, M., Caballero-Pérez, J. F., Guillén-Díaz, S., & Espinosa-Zaragoza, S. (2013). Mejoramiento genético participativo en CACAO (*Theobroma cacao* L.). *Agro Productividad*, 6(5), 71-80. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.352278>
- Baker, R. J. (1986). *Selection indices in Plant Breeding* (CRC Press). CRC Press.
- Ballesteros P., W. (2011). *Caracterización morfológica de árboles elite de cacao (Theobroma cacao L.) en el municipio de Tumaco, Nariño, Colombia [Maestría]*. Universidad de Nariño.
- Ballesteros P., W., Lagos B., T. C., & Ferney L., H. (2015). Morphological characterization of elite cacao trees (*Theobroma cacao* L.) in Tumaco, Nariño, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 9(2), 313-328. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2015v9i2.4187>
- Barros N., O. (1981). *Cacao*. Instituto Colombiano Agropecuario - ICA.
- Bekele, F. L., Bidaisee, G. G., Singh, H., & Saravanakumar, D. (2020). Morphological characterisation and evaluation of cacao (*Theobroma cacao* L.) in Trinidad to facilitate utilisation of Trinitario cacao globally. *Genet Resour Crop Evolution*, 67, 621-643. [https://doi.org/10.1007/s10722-019-00793-7\(0123456789\(\).,-volV\)\(01234567](https://doi.org/10.1007/s10722-019-00793-7(0123456789().,-volV)(01234567)
- Cambrai, A., Marcic, C., Morville, S., Sae Houer, P., Bindler, F., & Marchioni, E. (2010). Differentiation of Chocolates According to the Cocoa's Geographical Origin Using Chemometrics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(3), 1478-1483. <https://doi.org/10.1021/jf903471e>
- Chaux, M. A., & Pérez, M. A. (2017). *¿Nuevos caminos para los cacaos especiales de Colombia?* Fundación Swisscontac Colombia. https://www.colombiamascompetitiva.com/wp-content/uploads/2018/10/Nuevos_Caminos_Cacaos_Especiales.pdf
- CIAT. (2011a). *Caracterización molecular de 93 genotipos de cacao Theobroma cacao L. con microsatélites amplificados al azar RAMs* (Reporte final No. MIDAS-A-01652-11-c-921; Número No. MIDAS-A-01652-11-c-921, p. 24). CIAT.
-

- CIAT. (2011b). *Evaluación sensorial del cacao local de Tumaco (Nariño) como un aporte al desarrollo agrícola del Pacífico Colombiano* (Reporte final No. MIDAS-A-01652-11-C-921; Número No. MIDAS-A-01652-11-C-921, p. 26). CIAT.
- Cilas, C., Phillips-Mora, W., Mata-Quirós, A., Bastide, P., Johnson, V., Castillo-Fernández, J., Ribeyre, F., & Dessauw, D. (2023). *How many years of evaluation are needed to select new productive cocoa clones?* [Presentación]. Simposio Internacional de Investigación del Cacao - ISCR 2022, Montpellier. Zenodo. <https://zenodo.org/records/10208498>
- Compañía Nacional de Chocolates. (2018). *Protocolo para la caracterización morfológica de árboles élite de cacao (Theobroma cacao L.)*. Compañía Nacional de Chocolates, Grupo Nutresa. https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2020/06/Cartilla_Protocolo_Cacao-dic20_VFF.pdf
- Cordine, M. T., Lima, H., Gálvez, G., & Sigarrosa, A. (1985). *Genética vegetal y fitomejoramiento*. Editorial Científico - Técnica.
- Corporación para el desarrollo agroempresarial de Tumaco. (2009). *Acuerdo regional de competitividad de cacao de Nariño*. Convenio Agencia de Desarrollo Local ADEL de Nariño.
- da Silva G., M. E., dos Santos Dias, L. A., Vasconcellos C., C. M., Spaggiari S., C. A., Ferreira A., O., Santos B., C., Rodrigues P., G., dos Santos, F. J., & Roseli C., T. (2022). Genetic evaluation and selection of cocoa tree clones. *Ciencia Rural*, 52(12), 1-8. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210433>
- Delgadillo-Duran, P., Berdugo-Cely, J. A., Mejía-Salazar, J., Pérez-Zuñiga, J. I., & Yockteng, R. (2024). Exploring the Diversity and Ancestry of Fine-Aroma Cacao from Tumaco, Colombia. *Diversity*, 16, 1-17. <https://doi.org/10.3390/d16120754>
- Escobar T., J. E. (2008). *Caracterización morfológica in situ de árboles regionales sobresalientes de cacao Theobroma cacao L., en los núcleos productivos del municipio de Tumaco – Nariño* [Ingeniero]. Universidad de Nariño.
- FEDECACAO. (2021). *Guía Técnica Cultivo de Cacao en Colombia*. TCIMPRESORES S.A.S.
- FEDECACAO & CORPOICA. (2009). *Mejoramiento genético para incrementar la producción y productividad del sistema cacao en Colombia*. Union Temporal Colombia Uno.
- Follana, C. (2024). *Revision of Annex “C” of the International Cocoa Agreement (ICA), 2010*. International Cocoa Organization. <https://www.icco.org/revision-of-annex-c-of-the-international-cocoa-agreement-ica-2010-3/>
- Gil, A., Jaimes, A., Vega, F. N., Martínez, H., Bautista, H., Urrego, J. E., Calderon B., L. E., Hincapié, O. D., Hernández, P. E., Restrepo Q., T. I., & Ardila D., N. (2024). Obtención de un nuevo cultivar de cacao (*Theobroma cacao L.*) en Colombia «CNCH12». *Temas Agrarios*, 29(1), 82-99. <https://doi.org/10.21897/gg0cg694>
-

- Gobernación de Nariño. (2024). *Plan Departamental de Extensión Agropecuaria – PDEA Nariño 2024 – 2027*. Gobernación de Nariño. https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2024/08/01_PDEANARINO_2024.pdf
- González, S. I. R., Báez, O. L., Zaragoza, S. E., Márquez, I. E. H., & Gómez, S. G. (2014). Implementación de la metodología de selección participativa de Cacao en el municipio de Tecpatán, Chiapas- México. *Espacio I+D, Innovación más desarrollo*, 3(6), 6. <https://doi.org/10.31644/IMASD.6.2014.a01>
- Gutiérrez S., M. (2007). *Prácticas de control de calidad de cacao en centro de acopio*. Programa Desarrollo Rural Sostenible de la GTZ. https://cadenacacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/Prcticas_de_control_de_calidad_de_cacao.pdf
- ICA. (2012a). *Manejo fitosanitario del cultivo del cacao (Theobroma cacao L.)*. PRODUMEDIOS. <http://www.ica.gov.co/getattachment/c01fa43b-cf48-497a-aa7f-51e6da3f7e96/-nbspm; Manejo-fitosanitario-del-cultivo-de-Cacao.aspx>
- ICA. (2012b). *Manejo fitosanitario del cultivo del cacao (Theobroma cacao L.): Medidas para la temporada invernal*. Instituto Colombiano Agropecuario - ICA.
- ICONTEC, (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, CO). (2003). *Norma Técnica Colombiana NTC 1252: Cacao en grano* (Versión 3 ed., 3 ed.). ICONTEC. <http://flordebaba.com/colombiana.pdf>
- IGAC. (2024). *Temáticos | GEOPORTAL*. Mapas temáticos. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/tematicos>
- Jaimez, R. E., Vera, D. I., Mora, A., Llor, R. G., & Bailey, B. A. (2020). A disease and production index (DPI) for selection of cacao (*Theobroma cacao*) clones highly productive and tolerant to pod rot diseases. *Plant Pathology*, 69, 698-712. <https://doi.org/10.1111/ppa.13156>
- Kongor, J. E., Hinneh, M., Van de Walle, D., Ohene A., E., Boeckx, P., & Dewettinck, K. (2016). Factors influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao*) bean flavour profile—A review. *Food Research International*, 82, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.012>
- Lagos-Burbano, T. C. (2023). *Análisis estadístico para el mejoramiento genético vegetal*. Universidad de Nariño. https://sired.udenar.edu.co/7672/2/vf4_2021_An%C3%A1lisis%20estad%C3%ADstico%20para%20el%20mejoramiento%20gen%C3%A9tico%20vegetal.pdf
- López-Hernández, M. del P., Sandoval-Aldana, A. P., García-Lozano, J., & Criollo-Núñez, J. (2021). Estudio morfoagronómico de materiales de cacao (*Theobroma cacao* L.) de diferentes zonas productoras en Colombia. *Ciencia y Agricultura*, 18(3), 99-109. <https://doi.org/10.19053/01228420.v18.n3.2021.12570>

- López-Ramírez, C., Restrepo-Quiroz, T., & Solari, S. (2020). Diversidad y ecología de mamíferos no voladores asociados a un sistema agro-productivo de cacao, Granja Yariguíes, Santander, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 42(1), 1-13. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.v42n112a01>
- Motamayor, J. C., Lachenaud, P., Mota S. da, J. W., Looor, R., Kunh, D. N., Brown, J. S., & Schnell, R. J. (2008). Geographic and Genetic Population Differentiation of the Amazonian Chocolate Tree (*Theobroma cacao* L.). *Plos One*, 3(10), 10.
- Okabe, E. T., Almeida, C. M., Almeida, L. C., & Dias, A. S. (2004). Performance of cacao clones at ouro preto do oeste, Rondonia State, Brazil. *Revista Biociencia*, 20(3), 133-143.
- Osorio-Guarín, J. A., Berdugo-Cely, J., Coronado, R. A., Zapata, Y. P., Quintero, C., Gallego-Sánchez, G., & Yockteng, R. (2017). Colombia a Source of Cacao Genetic Diversity As Revealed by the Population Structure Analysis of Germplasm Bank of *Theobroma cacao* L. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01994>
- Ospino, A. R., Alvaréz, M. G., Machado-Sierra, E., & Aranguren, Y. (2020). Caracterización fenotípica y genotípica de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Dibulla, La Guajira, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), 3. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1557
- Palencia C., G. E., Coronado S., R., Bastidas P., S., & Mejia F., L. A. (2008). *Identificación, selección y multiplicación de árboles elite o de alto rendimiento de cacao (Theobroma cacao L.) con la participación de los agricultores*. CORPOICA. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/13262/Ver_Documento_13262.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Panda, A., Alveranga, N., da Silva, J. L., Partidário, A., Lageiro, M., Roseiro, C., & Dias, J. (2022). Influence of cocoa origin on the nutritional characterization of chocolate. *European Food Research and Technology*, 248, 2569-2577. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04070-3>
- Rahimi, M., & Debnath, S. (2023). Estimación de índices de selección óptimos y básicos en programas de mejoramiento vegetal y animal mediante el desarrollo de códigos SAS y R nuevos y simples. *Scientific Reports*, 13(18977). <https://doi.org/doi.org/10.1038/s41598-023-46368-6>
- Ramírez G., J. G. (2016). Pérdidas económicas asociadas a la pudrición de la mazorca del cacao causada por *Phytophthora* spp., y *Moniliophthora roreri* (Cif y Par) Evans et al., en la hacienda Theobroma, Colombia. *Revista Protección Vegetal*, 31(1), 42-49.
- Ramos, J. M., Beilhe, L. B., Alvarado, J., Rapidel, B., & Allinne, C. (2024). Disentangling shade effects for cacao pest and disease regulation in the Peruvian Amazonia. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(11), 10-17. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00948-6>

- Rojas, Y. E. C., Mosquera, G. O. M., Madroñero, D. A. A., & Rosero, J. K. M. (2021). Oferta exportable del cacao del departamento de Nariño (2010 – 2018). *Revista Tendencias*, 22(1), 279-302.
- Ruiz E., X. A. (2014). *Diversidad genética de cacao (Theobroma cacao L.) con marcadores moleculares microsatélites* [M.Sc., Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75268/7211504.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sánchez, I., Zárate, L. A., Gallego, G., & Tohme, J. (2007). Análisis de la diversidad genética de accesiones de Theobroma cacao L. del banco de conservación a cargo de Corpoica. *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(2), 2.
- Setyawati, B., & Mitrowihardjo, S. (2016). Determination of Selection Index of Cocoa (Theobroma cacao L.) Yield Traits Using Regression Methods. *Pelita Perkebunan*, 32(2), 83-90.
- Solís B., J. L., Zamarripa C., A., Pecina Q., V., Garrido R., E., & Hernández G., E. (2015). Evaluación agronómica de híbridos de cacao (Theobroma cacao L.) para selección de alto rendimiento y resistencia en campo a moniliasis. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(1), 71-82.
- UPRA. (2023). *Plan de ordenamiento productivo: Analisis situacional de la cadena productiva del cacao y su agroindustria en Colombia*. Unidad de Planificación de Tierras Rurales, Adecuación de Tierras y Usos Agropecuarios - UPR. <https://upra.gov.co/es-co/Paginas/pop-cacao.aspx>
- USAID. (2022). *Acuerdo de competitividad cadena de cacao chocolate en Colombia: 2022 – 2030*.
-