



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Efecto del ambiente sobre la capacidad antioxidante en genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja)**

**María del Socorro Cerón Lasso**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Doctorado en Ciencias Agrarias  
Bogotá, Colombia

2024



# **Efecto del ambiente sobre la capacidad antioxidante en genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja)**

**María del Socorro Cerón Lasso**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Doctor en Ciencias Agrarias**

Director:

Dr. Carlos Eduardo Núñez López

Codirector:

Dr. Benjamín Alberto Rojano

Línea de Investigación:

Genética y Fitomejoramiento

Grupos de Investigación:

Mejoramiento Genético Vegetal, Uso y Aprovechamiento de la Agrobiodiversidad -  
AGROSAVIA

Química de los Productos Naturales y de los Alimentos - UNAL, Sede Medellín

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ciencias Agrarias

Bogotá, Colombia

2024



*Dedico este trabajo al todo poderoso que me dio la templanza y la  
fortaleza para seguir, aún con adversidades en el camino, para  
alcanzar los objetivos trazados.*

*A mis hijos porque son el motor de mi vida y por brindarme su amor  
y comprensión en todo momento.*

*A mis hermanos y familiares quienes son mi soporte moral  
incondicional.*

*A mis amigos y colegas por sus consejos y recomendaciones  
para llevar a cabo la investigación*



# **Declaración de obra original**

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

**María del Socorro Cerón Lasso**

**Fecha:** 28/07/2024



## **Agradecimientos**

Durante mi transitar por el camino de mi formación académica, son varias las personas y las instituciones que merecen mi gratitud y reconocimiento, a quienes agradezco:

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), empresa donde laboro por otorgarme la comisión de estudios que me permitió realizar mis estudios de doctorado.

A todos los agricultores y procesadores por su conocimiento, interés, dedicación y aporte en todos los eventos y procesos de selección participativa realizados en los genotipos objeto de estudio.

A la Doctora Luz Stella Barrero Meneses, Investigadora de AGROSAVIA, por sus consejos y recomendaciones para el desarrollo de mi anteproyecto de tesis.

A mi director de tesis, el Doctor Carlos Eduardo Núñez por sus enseñanzas, consejos y recomendaciones para favorecer mi formación académica y el desarrollo de la investigación.

A mi codirector de tesis, el Doctor Benjamín Alberto Rojano y su equipo del Laboratorio de Ciencias de los Alimentos en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, por impartirme sus conocimientos y el apoyo en la investigación.

A la Doctora Gabriela Burgos y su equipo de trabajo en el Laboratorio de Nutrición y Calidad del Centro Internacional de la Papa por compartir sus experiencias en beneficio de mi formación académica y el desarrollo del trabajo de Investigación.

A Jorge Argüelles, Elías Alexander Silva, Gina Cruz, Yajaira Romero y demás colegas de AGROSAVIA por todas las orientaciones y consejos durante mis estudios de doctorado.

A mi amiga Lena Prieto por estar siempre y darme ánimos para seguir en mi formación y proyecto de vida.



## Resumen

### **“Efecto del ambiente sobre la capacidad antioxidante en genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja)”.**

La colección de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) del banco de germoplasma de la nación colombiana administrado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) procura estudios fenotípicos de interés nutricional y funcional. El objetivo consistió en evaluar el efecto del ambiente sobre la capacidad antioxidante (CAO), fenoles totales y vitamina C de 28 genotipos de papa diploide, más dos variedades comerciales como testigos. Se sembraron en 8 ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca, Colombia, bajo diseño de bloques completos al azar. Las muestras crudas en base seca (BS) presentaron CAO por ABTS 5122,9 a 9334,5  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g}$ , fenoles totales 164,63 a 317,01 mg GAE/100g y vitamina C 12,73 a 16,51 mg EqAA/100g. Las muestras cocidas en BS mostraron CAO por ABTS 6777,42 a 11253,72  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g}$ , fenoles totales 229,7 a 450,02 mg GAE/100g y vitamina C 6,14 a 9,70 mg EqAA/100g. CAO por ABTS y fenoles totales mostraron alta correlación entre muestras cruda ( $r=0,88$ ) y cocida ( $r=0,82$ ). Vitamina C no presentó correlación con las demás variables. Los análisis del modelo AMMI identificaron genotipos estables, de adaptación específica y de alto efecto sobre la interacción genotipo por ambiente (GxA). Las variables climáticas grados días acumulados, temperatura media al ciclo del cultivo y temperatura mínima a 60 días antes de la cosecha; más, las características del suelo potasio intercambiable, hierro y zinc disponibles contribuyeron a la expresión de las variables estudiadas. El rendimiento promedio fue 17208 kg.ha<sup>-1</sup>. La caracterización fisicoquímica de 21 genotipos cuantificó materia seca 22,75 a 27,94% y almidón 15,07 a 22,40%BH. Sobresalieron los genotipos Botella Roja, G2593, G2027 y G0077. En conclusión, para las variables estudiadas se encontró efecto altamente significativo de genotipos, ambiente e interacción GxA.

**Palabras clave:** Estabilidad, propiedades antioxidantes, nutrientes, rendimiento, análisis de componentes principales

## Abstract

**“Effect of environment on antioxidant capacity in diploid potato genotypes (*Solanum tuberosum* Phureja Group)”.**

The collection of diploid potatoes (*Solanum tuberosum* Group Phureja) from plant germplasm bank of Colombian nation administered by Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) seeks phenotypic studies of nutritional and functional interest. The objective was to evaluate the effect of the environment on the antioxidant capacity (AOC), total phenolics, and vitamin C of 28 diploid potato genotypes, plus two commercial varieties as controls. They were planted in 8 environments in four municipalities of departamento de Cundinamarca, Colombia, under a complete randomized block design. The raw samples in dry base (DB) presented AOC by ABTS 5122.9 to 9334.5  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g}$ , total phenols 164.63 to 317.01 mg GAE/100g, and vitamin C 12.73 to 16.51 mg EqAA/100g. The cooked samples in DB showed AOC by ABTS 6777,42 to 11253,72  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g}$ , total phenols 229,7 to 450,02 mg GAE/100g, and vitamin C 6,14 to 9,70 mg EqAA/100g. AOC by ABTS and total phenols showed high correlation between raw ( $r=0.88$ ) and cooked ( $r=0.82$ ) samples. Vitamin C did not present a correlation with other variables. AMMI model analyzes identified stable genotypes, of adaptive-specific, and of high effect on genotype-by-environment interaction (GxE). The climatic variables accumulated degree days, average temperature during crop cycle and minimum temperature 60 days before harvest; more, the soil characteristics of exchangeable potassium, available iron and zinc contributed to expression of studied variables. The average yield was 17208 kg.ha<sup>-1</sup>. Physicochemical characterization of 21 genotypes quantified dry matter 22.75 to 27.94% and starch 15.07 to 22.40%WB. Botella Roja, G2593, G2027, and G0077 genotypes stood out. In conclusion, for the studied variables was found a highly significant effect of genotypes, environment, and GxE interaction.

**Keywords:** Stability, antioxidant properties, nutrients, yield, principal component analysis

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen y Abstract.....</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1. Marco conceptual y estado del arte .....</b>	<b>3</b>
1.1 Taxonomía.....	3
1.2 Tubérculo.....	4
1.3 Papa diploide ( <i>Solanum tuberosum</i> Grupo Phureja) .....	6
1.4 Composición nutricional de la papa diploide .....	7
1.5 Capacidad antioxidante.....	8
1.6 Fenoles totales.....	11
1.7 Vitamina C .....	14
1.8 Interacción genotipo por ambiente .....	15
1.9 Rendimiento de cultivares de papa .....	18
1.10 Bibliografía.....	20
<b>2. Efecto del ambiente sobre capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C de muestras crudas y cocidas de papa diploide Grupo Phureja .....</b>	<b>33</b>
Resumen .....	33
Abstract .....	34
2.1 Introducción .....	34
2.2 Materiales y métodos.....	36
2.2.1 Método de selección de genotipos para el estudio .....	36
2.2.2 Material vegetal .....	36
2.2.3 Localización.....	36
2.2.4 Diseño experimental, establecimiento y manejo del cultivo .....	41
2.2.5 Preparación de la muestra .....	42
2.2.6 Determinación de los compuestos antioxidantes .....	43
2.2.7 Análisis estadístico .....	45
2.3 Resultados y discusión .....	47
2.3.1 Estadística descriptiva para capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C ...	47
2.3.2 Análisis de varianza combinado.....	49
2.3.3 Análisis de correlación entre capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C ...	57
2.3.4 Análisis de componentes principales de variables de ambiente .....	59

2.3.5 Variables de ambiente que afectan la respuesta de la capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C .....	63
2.4 Conclusiones .....	72
2.5 Bibliografía .....	73
<b>3. Análisis de estabilidad fenotípica para la capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C en genotipos de papa diploide (<i>Solanum tuberosum</i> Grupo Phureja).....</b>	<b>85</b>
Resumen .....	85
Abstract .....	86
3.1 Introducción .....	86
3.2 Metodología.....	87
3.2.1 Localización .....	87
3.2.2 Material vegetal.....	87
3.2.3 Diseño experimental y prácticas agronómicas .....	88
3.2.4 Rendimiento.....	89
3.2.5 Análisis estadístico.....	89
3.2.6 Identificación de genotipos relevantes .....	90
3.3 Resultados y discusión .....	90
3.3.1 Análisis de estabilidad fenotípica .....	90
3.3.2 Rendimiento .....	123
3.3.3 Genotipos relevantes .....	133
3.4 Conclusiones.....	135
3.5 Bibliografía .....	136
<b>4. Composición fisicoquímica y aporte a la ingesta de la población colombiana de genotipos de papa diploide (<i>Solanum tuberosum</i> Grupo Phureja).....</b>	<b>145</b>
Resumen.....	145
Abstract .....	146
4.1 Introducción .....	146
4.2 Materiales y métodos.....	148
4.2.1 Localización .....	148
4.2.2 Material vegetal.....	148
4.2.3 Preparación de las muestras y análisis.....	149
4.2.4 Valoración de la ingesta.....	150
4.2.5 Análisis estadístico.....	151
4.3 Resultados y discusión .....	151
4.3.1 Composición fisicoquímica .....	151
4.3.2 Aportes a la ingesta de energía y nutrientes.....	155
4.4 Conclusiones.....	159
4.5 Bibliografía.....	160
<b>5. Conclusiones y recomendaciones generales .....</b>	<b>165</b>
5.1 Conclusiones.....	165
5.2 Recomendaciones.....	166
A. Anexo Matriz de correlación de Pearson de todas las variables en estudio para muestras crudas.....	170

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Genotipos de papa diploide utilizados en la determinación de capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C	38
<b>Figura 2.</b> Componentes principales de variables de ambiente en la evaluación de 30 genotipos del Grupo Phureja establecidos en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	59
<b>Figura 3.</b> Biplot del análisis AMMI para capacidad antioxidante por ABTS de muestras crudas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	94
<b>Figura 4.</b> Biplot del análisis AMMI para capacidad antioxidante por ABTS de muestras cocidas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	97
<b>Figura 5.</b> Biplot del análisis AMMI para capacidad antioxidante por FRAP de muestras crudas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	103
<b>Figura 6.</b> Biplot del análisis AMMI para capacidad antioxidante por FRAP de muestras cocidas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	105
<b>Figura 7.</b> Biplot del análisis AMMI para fenoles totales de muestras crudas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	110
<b>Figura 8.</b> Biplot del análisis AMMI para fenoles totales de muestras cocidas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	114
<b>Figura 9.</b> Biplot del análisis AMMI para vitamina C de muestras crudas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	

<b>Figura 10.</b> Biplot del análisis AMMI para vitamina C de muestras cocidas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	119
<b>Figura 11.</b> Promedio de rendimiento de los 30 genotipos de papa diploide evaluados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	122
<b>Figura 12.</b> Biplot del análisis AMMI para el rendimiento de tubérculos (kg.15 m <sup>-2</sup> ) de 30 genotipos de papa diploide evaluados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	127
<b>Figura 13.</b> Genotipos de papa diploide evaluados para determinar composición fisicoquímica	131
	150

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Composición nutricional de la papa diploide variedad Criolla Colombia	8
<b>Tabla 2.</b> Descripción morfológica de los genotipos de papa diploide evaluados según descriptores propuestos por Huamán (2008)	37
<b>Tabla 3.</b> Variables climáticas tomadas en estaciones meteorológicas donde se realizaron los ensayos de campo con los genotipos evaluados (años 2013-2014)	39
<b>Tabla 4.</b> Características fisicoquímicas de los suelos donde se establecieron los ensayos	40
<b>Tabla 5.</b> Métodos de análisis para la determinación de capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C	43
<b>Tabla 6.</b> Consolidado de muestras y de pruebas de laboratorio para los análisis estadísticos	47
<b>Tabla 7.</b> Estadística descriptiva de 30 genotipos de papa diploide para la capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C	48
<b>Tabla 8.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza combinado en muestras crudas y cocidas	50
<b>Tabla 9.</b> Medias de capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP, fenoles totales y vitamina C en muestras crudas y cocidas para los ocho ambientes de evaluación	52
<b>Tabla 10.</b> Medias de capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP en base seca de muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	53
<b>Tabla 11.</b> Medias de fenoles totales en base seca de muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	55
<b>Tabla 12.</b> Medias de vitamina C en base seca de muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes del departamento de	

Cundinamarca	56
<b>Tabla 13.</b> Correlación de Pearson de capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C para muestras crudas y cocidas de los genotipos de papa diploide	58
<b>Tabla 14.</b> Valores propios, variabilidad individual y acumulada de los componentes principales	60
<b>Tabla 15.</b> Contribución de variables climáticas y características fisicoquímicas del suelo en la conformación de componentes principales	61
<b>Tabla 16.</b> Análisis de covarianza y estimadores para capacidad antioxidante por ABTS en muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide	65
<b>Tabla 17.</b> Análisis de covarianza y estimadores para capacidad antioxidante por FRAP en muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide	67
<b>Tabla 18.</b> Análisis de covarianza y estimadores para fenoles totales en muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide	69
<b>Tabla 19.</b> Análisis de covarianza y estimadores para vitamina C en muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide	71
<b>Tabla 20.</b> Prueba estadística del modelo AMMI	90
<b>Tabla 21.</b> Análisis de varianza AMMI para la capacidad antioxidante por ABTS de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca	91
<b>Tabla 22.</b> Componentes principales del modelo AMMI para la capacidad antioxidante por ABTS en muestras crudas y cocidas de 30 genotipos de papa diploide	91
<b>Tabla 23.</b> Promedios de capacidad antioxidante por ABTS y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa diploide	93
<b>Tabla 24.</b> Análisis de varianza AMMI de la capacidad antioxidante por FRAP de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca	100
<b>Tabla 25.</b> Componentes principales del modelo AMMI para la capacidad antioxidante por FRAP en muestras crudas y cocidas de 30 genotipos de papa diploide	100
<b>Tabla 26.</b> Promedios de capacidad antioxidante por FRAP y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa	

diploide	102
<b>Tabla 27.</b> Análisis de varianza AMMI para fenoles totales de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca	107
<b>Tabla 28.</b> Componentes principales del modelo AMMI para fenoles totales en muestras crudas y cocidas de 30 genotipos de papa diploide	28
<b>Tabla 29.</b> Promedios de fenoles totales y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa diploide	109
<b>Tabla 30.</b> Análisis de varianza AMMI para vitamina C de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca	116
<b>Tabla 31.</b> Componentes principales del modelo AMMI para vitamina C en muestras crudas y cocidas de 30 genotipos de papa diploide	117
<b>Tabla 32.</b> Promedios de vitamina C y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa diploide	118
<b>Tabla 33.</b> Estadística descriptiva para rendimiento de 30 genotipos de papa diploide evaluados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	124
<b>Tabla 34.</b> Análisis de varianza combinado para rendimiento de 30 genotipos de papa diploide evaluados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	124
<b>Tabla 35.</b> Comparación de medias para rendimiento de los genotipos evaluados en los ocho ambientes del departamento de Cundinamarca	125
<b>Tabla 36.</b> Comparación de medias para rendimiento de 30 genotipos de papa diploide evaluados	128
<b>Tabla 37.</b> Análisis de varianza AMMI para el rendimiento de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca	128
<b>Tabla 38.</b> Componentes principales del modelo AMMI para rendimiento de 30 genotipos de papa diploide	129
<b>Tabla 39.</b> Promedios de rendimiento y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa diploide	130
<b>Tabla 40.</b> Mejores genotipos identificados por la respuesta a las variables de evaluación	134
<b>Tabla 41.</b> Métodos para las determinaciones fisicoquímicas	149
<b>Tabla 42.</b> Análisis descriptivo de variables fisicoquímicas evaluadas en 21	

genotipos de papa diploide evaluados y cultivados en el municipio de El Rosal	152
<b>Tabla 43.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables fisicoquímicas en 21 genotipos de papa diploide evaluados y cultivados en el municipio de El Rosal	152
<b>Tabla 44.</b> Comparación de medias de las variables fisicoquímicas de 21 genotipos de papa diploide evaluados en el municipio de El Rosal del departamento de Cundinamarca	153
<b>Tabla 45.</b> Aporte a la ingesta de energía de 100 g de genotipos de papa diploide evaluados en el municipio de El Rosal	156
<b>Tabla 46.</b> Aporte a la ingesta de proteína y de carbohidratos de 100 g de genotipos de papa diploide evaluados en el municipio de El Rosal	157
<b>Tabla 47.</b> Aporte a la ingesta de vitamina C de 100 g de materia seca de tubérculos cocidos de los genotipos de papa diploide evaluados en el municipio de El Rosal.	159

# Objetivos

## Objetivo General

Evaluar el efecto del ambiente sobre la capacidad antioxidante y el contenido de fenoles totales y vitamina C en genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja).

## Objetivos específicos

- Determinar el efecto del ambiente sobre la respuesta de las variables fenoles totales, capacidad antioxidante y vitamina C, en tubérculos crudos y cocidos de genotipos seleccionados de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) del banco de germoplasma vegetal de AGROSAVIA.
- Evaluar la estabilidad fenotípica para las variables fenoles totales, capacidad antioxidante y vitamina C, en tubérculos crudos y cocidos de genotipos seleccionados de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) del banco de germoplasma vegetal de AGROSAVIA.
- Evaluar el potencial de rendimiento y características fisicoquímicas en genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja), procedentes del banco de germoplasma vegetal de AGROSAVIA.



## Introducción

Dentro de la canasta familiar de la población alto andina colombiana se incluye el consumo de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) de color amarillo. No obstante, existen tubérculos de genotipos diploides con coloraciones en carne y en piel, como rosadas, moradas, violetas, entre otras; los cuales, ofrecen ventajas nutricionales para los consumidores y se requiere visibilizar estos genotipos para ser incluidos en la canasta familiar. Este recurso genético está conservado en el banco de germoplasma vegetal de la nación colombiana que administra la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), en la cual se requiere identificar los atributos de interés agronómicos, nutricionales, funcionales y de rendimiento; para que estos recursos genéticos sean visibilizados, conocidos, difundidos y aprovechados en el futuro tanto por los programas de mejoramiento genético como por el sector productivo agrícola y por los consumidores.

En la producción de una especie de interés para la agricultura y la alimentación, como lo es la papa diploide, los efectos de las variables climáticas y de las características fisicoquímicas del suelo inciden en la producción de los cultivos y, por consiguiente, se reflejan en la composición fisicoquímica y de antioxidante de los tubérculos cosechados. Por ende, al llevar los tubérculos crudos a procesos de cocción, es importante estudiar el grado de estabilidad de los compuestos nutricionales de los tubérculos y conocer su potencial beneficio en la salud humana. Así mismo, es importante relacionar la procedencia de los tubérculos llevados a cocción para identificar si hay, o no, efecto de los ambientes en la expresión de estos caracteres e identificar ambientes que los favorecen.

Investigaciones encaminadas a seleccionar genotipos nativos con compuestos antioxidantes, composición fisicoquímica y buen comportamiento agronómico en diferentes ambientes podría permitir incluir dichos genotipos en el sistema productivo y/o para su uso en los programas de mejoramiento como potenciales parentales; para que

en un futuro se obtengan variedades mejoradas en el país, que además de los caracteres de comportamiento agronómico, posean atributos nutricionales y funcionales que beneficien la salud del consumidor y promuevan valores agregados al cultivo de papa.

El presente estudio buscó evaluar el efecto del ambiente sobre la capacidad antioxidante, el contenido de fenoles totales y la vitamina C de 28 genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) conservados en el banco de germoplasma vegetal de AGROSAVIA y que fueron seleccionados previamente mediante investigación participativa con agricultores, más dos variedades comerciales como testigos. Los genotipos se establecieron en ocho ambientes de los municipios de Mosquera (Centro de Investigación Tibaitatá – AGROSAVIA), El Rosal, Zipaquirá y Une del departamento de Cundinamarca y una vez, cosechados los tubérculos se determinaron los componentes antioxidantes en crudo y en cocido.

El documento de la investigación se estructuró en cuatro capítulos. Primero, se presenta el estado de arte de los conceptos principales. Segundo, se muestra la evaluación de la capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C, cuyos resultados se examinaron por análisis de varianza combinado para considerar los efectos de los genotipos (efecto fijo), del ambiente (efecto aleatorio) y de la interacción GxA, además las comparaciones de medias con la prueba de Tukey. Tercero, se presenta el análisis de la interacción GxA mediante el modelo AMMI (efectos principales aditivos y de interacción multiplicativa) para identificar aquellos genotipos de repuesta estable, de adaptación específica y de alto efecto de interacción, con el fin de seleccionar los genotipos sobresalientes por las variables de estudio y el rendimiento, dirigidos a proponer genotipos para el sector productivo o para incluirlos en programas de mejoramiento. Cuarto, se reportan las características fisicoquímicas y la ingesta de energía más nutrientes de 21 genotipos de papa diploide establecidos en el municipio de El Rosal que presentó condiciones de estrés hídrico por sequía en un ambiente.

Mediante el estudio se pudo determinar las variables climáticas y las características fisicoquímicas del suelo que afectan la respuesta de las variables en estudio. La estabilidad fenotípica identificó genotipos estables y con respuesta superior al promedio general; genotipos con máxima expresión de las variables; y genotipos con mayor efecto sobre la interacción GxA.

# 1. Marco conceptual y estado del arte

La papa (*Solanum tuberosum* L.), tubérculo alimenticio prioritario en el mundo por ser fuente de vitaminas, minerales, fibra dietaria y antioxidantes (D'Amelia et al., 2022), es el tercer cultivo después del arroz y el trigo (CIP, 2023), con una producción de más de 374 millones de toneladas y un consumo *per cápita* mundial de 33,0 kg según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO-FAOSTAT, 2022). Este tubérculo es fundamental en las dietas alimentarias de las poblaciones de América del Sur y del Caribe (FAO et al., 2020).

## 1.1 Taxonomía

La papa pertenece a la familia de las Solanáceas y al género *Solanum*, posee más especies silvestres relacionadas que cualquier otro cultivo. Las papas cultivadas han sido clasificadas como especies bajo la nomenclatura del ICBN (International Code of Botanical Nomenclature) (Bukasov, 1971; Greuter et al., 2000) que reconoció 21 especies. También, Dodds y Paxman (1962) reconocieron tres especies, Hawkes (1990) reconoció siete especies con siete subespecies y Ochoa (1990; 1999) reconoció nueve especies. Huamán y Spooner (2002), utilizaron la nomenclatura del ICNCP (International Code of Nomenclature of Cultivated Plants) y tuvieron en cuenta el posible origen híbrido, múltiples orígenes, dinámica evolutiva, continua hibridación y clasificaron todas las papas cultivadas como una sola especie *Solanum tuberosum* L., con ocho grupos cultivados, así: *Ajanhuiri* (diploide,  $2n = 2x = 24$ ); *Phureja* (diploide,  $2n = 2x = 24$ ); *Stenotomun* (diploide,  $2n = 2x = 24$ ); *Juzepczukii* (triploide,  $2n = 3x = 36$ ); *Chaucha* (triploide,  $2n = 3x = 36$ ); *Andigena* (tetraploide,  $2n = 4x = 48$ ), *Chilotanum* (tetraploide,  $2n = 4x = 48$ ) y *Curtilobum* (pentaploide,  $2n = 5x = 60$ ) (Huamán y Spooner 2002; Spooner y Salas, 2006). En estudios realizados por Spooner et al. (2007) consolidaron dos grandes grupos, uno, *Solanum tuberosum* Grupo Andigenum constituido por papas diploides, triploides y tetraploides o papas andinas de

tierras altas; y dos, *Solanum tuberosum* Grupo *Chilotanum* conformado por papas diploides, tetraploides y pentaploides de tierras bajas.

La papa posee un amplio reservorio genético con miles de variedades locales andinas y más de 100 parientes silvestres (Mihovilovich et al., 2015). La papa fue domesticada en el altiplano andino (Hardigan et al., 2017), entre Bolivia y Perú (Gibbs et al., 2017), en un rango de altitud de 3000 a 4500 msnm, temperatura baja y alta radiación solar (Hardigan et al., 2017). Extendiéndose por los territorios de Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela, donde se encuentra la mayor variabilidad genética de especies silvestres y variedades cultivadas (Berdugo-Cely et al., 2023). El único origen de las papas diploides se sitúa cerca al Lago Titicaca, entre la frontera de Perú y Bolivia, a partir de poblaciones del complejo *S. brevicaule* (Spooner et al., 2005; Van den Berg y Jacobs, 2007) y las primeras papas domesticadas correspondieron a genotipos diploides de la especie *S. stenotomum* (Hawkes, 1990).

Existen alrededor de 5000 variedades de papas nativas en los Andes, de las cuales entre el 80 al 85% están caracterizadas y catalogadas en la Colección Mundial de Papa del Centro Internacional de la Papa (CIP) que, por encargo de la FAO mantiene en su banco genético una colección para el mejoramiento genético, puesto que presenta excelentes atributos agronómicos, culinarios y otras características para el desarrollo de variedades modernas, que han procedido de la domesticación de algunas especies silvestres que aún conservan rasgos similares con las papas que hoy se comercializan (Spooner y Hetterscheid, 2006).

## 1.2 Tubérculo

El tubérculo es un tallo subterráneo modificado que se forma en la porción subapical del estolón. El tubérculo crece por acumulación de agua y sólidos (Egúsqiza, 2000) y es un órgano de almacenamiento que contiene del 70 al 85% de la materia seca producida por la planta (Luján, 1991). En la papa diploide, a los 33 días después de emergencia se ha reportado la formación de 24 tubérculos (Valbuena et al., 2009).

Los factores que influyen en el desarrollo y crecimiento de los tubérculos de papa son genéticos, edad fisiológica, fotoperiodo y calidad de la luz, humedad y nutrientes. El

factor genético define en gran proporción la producción en campo y afecta primordialmente el rendimiento. Es así como, las variedades de papa presentan variación en el área vegetativa, el número de estolones y la distribución de estolones secundarios en la tuberización (Barona et al., 2015). La edad fisiológica del tubérculo sembrado afecta directamente la formación de estolones y de tubérculos, más que todo al inicio de la tuberización. Cuando el tubérculo utilizado como semilla presenta mayor edad fisiológica, el inicio de la tuberización es más precoz (Barona et al., 2015).

La duración del día es un factor importante en la formación de tubérculos de papa. La tuberización es afectada por el fotoperiodo corto aproximadamente de 12 h de luz y 12 h de oscuridad. Lo opuesto ocurre en latitudes donde se presentan fotoperiodos largos en verano, con días de más de 16 h de luz y noches cortas (Barona et al., 2015; Valbuena et al., 2009). Un incremento en la intensidad de radiación solar, por lo general, estaría relacionado con un incremento en el rendimiento final, pero en casos extremos, altos niveles de radiación están asociados también con altas temperaturas y excesiva transpiración que pueden ocasionar bajos rendimientos (Barona et al., 2015). El cultivo de papa se adapta a climas tropicales fríos, con temperaturas que pueden estar entre los 18 y 25 °C durante el día y entre los 8 y 15 °C durante la noche. Las altas temperaturas inhiben la tuberización tanto en fotoperiodos cortos como largos, aunque el grado de inhibición es mayor en fotoperiodos largos (más de 15 h de luz). Además, los nutrientes se consideran como un factor importante que afecta la inducción de tuberización, así como el número de tubérculos y su peso (Barona et al., 2015).

El contenido de fitonutrientes en los tubérculos de papa está influenciado por sus etapas de desarrollo. Los tubérculos cosechados en una etapa joven de desarrollo presentan mayores concentraciones de ácido clorogénico y de ácido fólico con respecto a los tubérculos maduros (Goyer y Navarre, 2009; Navarre et al., 2010). El contenido de carotenoides totales es mayor en tubérculos inmaduros que en maduros (Kotikova et al., 2007; Morris et al., 2004). Las antocianinas y los compuestos fenólicos totales aumentan cuando se cultivan los tubérculos en áreas con temperaturas frías y días más largos (Ezekiel et al., 2013). Reyes et al. (2004) observaron que las antocianinas y los fenoles totales disminuyeron con el crecimiento y la madurez del tubérculo, pero el rendimiento total por hectárea se incrementó en el tiempo.

Brar et al. (2017) mencionan que en un estudio se establecieron tubérculos de papa a 203, 960 y 1250 msnm; el mayor contenido de antocianinas se presentó en alturas mayores y los contenidos de carotenoides totales no fueron afectados. Se observó gran estabilidad en el contenido de polifenoles y la capacidad antioxidante a través del ambiente, lo que indicó que estos cultivares andinos podrían utilizarse en programas de mejoramiento para favorecer el contenido fenólico (André et al., 2009).

### **1.3 Papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja)**

El Grupo Phureja es un conjunto de variedades nativas de papa que crecen extensamente en los Andes desde el occidente de Venezuela hasta el centro de Bolivia. Se distingue por presentar adaptación a días cortos, su nivel de ploidía es diploide ( $2n=2x=24$ ) y el tubérculo no posee reposo (Huamán y Spooner, 2002). Actualmente conforma una de las principales colecciones existentes en el mundo por sus atributos agronómicos, de calidad culinaria, nutricional y funcional.

La papa diploide en Colombia es conocida como papa criolla que corresponde a los morfotipos que presentan tubérculos con color de piel y carne amarillo que pertenece al fenotipo “yema de huevo” (Rodríguez et al., 2009); además, de este mismo grupo taxonómico se cuenta con genotipos de colores de piel y de carne rosados, rojos y violetas. La papa diploide se cultivada entre 1800 y 3200 msnm, con un rango de temperatura promedio de 10 a 20°C, precipitación anual de 900 mm, en suelos con textura franca y pH entre 5,5 y 5,9 (Pérez et al., 2008). La papa diploide tiene muchas ventajas como cultivo comercial y alimentario; producen más nutrición, energía y biomasa comestible por unidad de área y tiempo que otros cultivos esenciales (Avilés-Chaves y Piedra-Naranjo, 2017). La FAO-FAOSTAT (2012), estimó que en los próximos 20 años el número de personas aumentará en 100 millones al año y el 95% de la papa se producirá en los países en desarrollo, para favorecer la seguridad alimentaria de los pueblos.

La papa diploide sobresale en Colombia por la diversidad de recursos genéticos y su aporte en la seguridad alimentaria. En lo que respecta al consumidor externo, este constituye la demanda potencial para la exportación de la papa diploide procesada a los mercados de Estados Unidos y Japón donde demandan en gran medida el

tubérculo por su sabor, color, tamaño y diferenciación de producto, lo que ofrece a Colombia ventajas comparativas para su comercialización (Bonilla et al., 2009). Los departamentos de Cundinamarca, Nariño y Boyacá en orden de importancia produjeron en el país 12.155,1 ha y aportaron una producción de 186.059,7 t (Agronet, 2022).

El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), la Federación Colombiana de Productores de Papa (Fedepapa) y la Universidad Nacional de Colombia evaluaron los atributos agronómicos, culinarios y agroindustriales de la variedad yema de huevo o clon 1; y en el año 2005, la Universidad Nacional de Colombia lo registró ante el ICA como Criolla Colombia (Ñustez-López, 2011). En Colombia el mejoramiento de la papa diploide inició en la década de 1990 y a la fecha se han registrado trece variedades (Zapata et al., 2022).

Ligarreto y Suárez (2003) evaluaron en 50 accesiones de papa diploide el potencial de los recursos genéticos para calidad industrial. Como resultado mostraron que los tres primeros componentes principales expresaron el 85% de la variabilidad total, donde las características más importantes fueron: diámetro ecuatorial, diámetro longitudinal, gravedad específica y contenido de azúcares; permitiendo agrupar las accesiones estudiadas por sus atributos de uso para procesamiento de: papa entera precocida, productos enlatados y congelados, encurtido en fresco y fermentado, y papa frita en hojuelas.

## **1.4 Composición nutricional de la papa diploide**

El tubérculo de papa es valorado por sus propiedades organolépticas (sabor, color, textura, forma), por su composición nutricional y funcional, y por la identidad cultural (Reinoso y Thiele, 2005). Existen diversos factores que influyen en la composición nutricional como: la variedad, el clima, los sistemas de manejo, el año agrícola, la zona de procedencia, la fisiología, el almacenamiento y la postcosecha (Bonierbale et al., 2004; Lister y Munro, 2000). En la Tabla 1 se muestra la composición nutricional de la papa diploide variedad Criolla Colombia.

**Tabla 1.** Composición nutricional de la papa diploide variedad Criolla Colombia

Con piel cocida sin sal		Con piel cruda		Sin piel cruda	
Análisis	Valor	Análisis	Valor	Análisis	Valor
Humedad (g)	79,4	Humedad (g)	75,4	Humedad (g)	73,2
Energía (kcal)	85,0	Energía (kcal)	96,0	Energía (kcal)	106,0
Proteína (g)	1,4	Proteína (g)	2,2	Proteína (g)	2,0
Lípidos (g)	0,0	Lípidos (g)	0,1	Lípidos (g)	0,4
Carbohidratos totales (g)	18,1	Carbohidratos totales (g)	21,1	Carbohidratos totales (g)	23,3
Carbohidratos disponibles (g)	15,2	Carbohidratos disponibles (g)	20,5	Carbohidratos disponibles (g)	22,9
Fibra dietaria (g)	3,0	Fibra dietaria (g)	0,6	Fibra dietaria (g)	0,4
Cenizas (g)	1,0	Cenizas (g)	1,2	Cenizas (g)	1,1

*Nota.* Valores dados para 100 g de la parte comestible según ICBF (2018).

Garnica et al. (2022) determinaron en genotipos de papa diploide contenidos de materia seca entre 17,66 a 27,22%, cenizas entre 0,62 a 1,66%, azúcares reductores desde 0,043 a 0,345%, almidón desde 11,95 a 23,23 % y proteína entre 0,75 a 2,46% en base húmeda (BH). Las papas pigmentadas contienen antocianinas según Ji et al. (2012), antinutrientes como  $\alpha$ -solanina (0,001 a 47,2 mg/100 g), cantidades menores de proteína (0,85-4,2%), aminoácidos y otras vitaminas como B3 y B6, de acuerdo con Burlingame et al. (2009) y Storey (2007). La papa es fuente de minerales como K, P, Ca y Mg (Andre et al., 2007), contiene bajas cantidades de provitamina A y otros compuestos bioactivos que benefician el cuerpo humano (Burlingame et al., 2009).

Con el paso del tiempo se han identificado componentes fisiológicamente activos o bioactivos en los alimentos como la papa (Krist-Etherton et al., 2002). La papa diploide es fuente de carotenoides (hasta 2700 mcg/100g), en la piel se encuentran compuestos fenólicos como el ácido clorogénico (hasta 1570 mcg/100g) (Burlingame et al., 2009) y sus polímeros (Rodríguez del Sotillo et al, 1994, Nara et al., 2006; Al-Saikhan et al., 1995); el ácido ferúlico y el ácido cumárico (Nara et al., 2006; Reyes et al., 2005), entre otros.

## 1.5 Capacidad antioxidante

Los antioxidantes son compuestos presentes en los alimentos, su importancia radica en el papel que desempeñan en la salud humana, ya que pueden prevenir y eliminar sustancias potencialmente nocivas. Estas sustancias se pueden clasificar como sintéticos

o naturales, los primeros son de bajo costo y alta efectividad, pero están siendo cuestionados porque se ha demostrado que tienen ciertos efectos carcinógenos y mutagénicos. Los segundos encuentran su origen en el mundo vegetal, en ciertas plantas, semillas, frutos y tubérculos, lo que ha incentivado la investigación en esta área (Vargas et al., 2005). Estos compuestos son importantes para la población ya que el organismo está expuesto a la influencia y al ataque de especies químicas como los radicales libres y la forma de detener los procesos de oxidación es a través del uso de antioxidantes. Estas sustancias pueden disminuir o detener los procesos oxidativos por la facilidad de ceder un átomo de hidrógeno para estabilizar a los radicales libres y así detener la reacción en cadena (Lambert y Yang, 2003). Los antioxidantes son capaces de inactivar los radicales libres que influyen negativamente en lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, retrasando el proceso de envejecimiento, combatiendo la degeneración y muerte de las células (Rojas-Barquera y Narváez-Cuenca, 2009).

Los antioxidantes cumplen funciones protectoras frente a desordenes propios del equilibrio redox del organismo, disminuyendo los efectos adversos que causan los radicales libres, principalmente las especies reactivas de oxígeno que se derivan de la respiración celular (Halliwell, 2006). La determinación de la capacidad antioxidante *in vitro* de un alimento es una medida de la expresión de sus compuestos antioxidantes, lo que proporciona una medida de su poder redox o comportamiento antirradical dentro de los tejidos y células corporales tras situaciones de estrés oxidativo (Bianchi y Falcioni, 2016).

Diversas accesiones de *Solanum tuberosum* L. han mostrado valores de capacidad antioxidante comparativamente más altos que otros cultivos de igual importancia como arroz, trigo y maíz (Goufo y Trindade, 2014; USDA, 2020). Varios genotipos de papa presentan colores rojizos y púrpuras tanto en piel como en carne, por la presencia de antocianinas en el tubérculo (Burgos et al., 2013). Los investigadores se han enfocado en una de las principales fuentes de antioxidantes para la población mundial como los compuestos fenólicos o fitonutrientes, que se encuentran en tubérculos de papa que por su alta demanda alimentaria (Bonierbale et al., 2010), contribuye en la ingesta diaria con antioxidantes (Xu et al., 2009).

La capacidad antioxidante de una muestra no se puede evaluar por un solo método, es decir, la capacidad antioxidante no depende únicamente de la suma de sus componentes, los factores como el microambiente en que se encuentra el compuesto influye en los resultados. El método *in vitro* suministra una idea aproximada de lo que puede ocurrir a nivel *in vivo* (Kuskoski et al., 2005). Además del mecanismo de reacción, existen otros factores que también deben considerarse al determinar la capacidad antioxidante de extractos de alimentos tales como: las propiedades coloidales del sustrato, el estado de oxidación y la localización del antioxidante en las distintas fases, la composición del sistema, el tipo de sustrato oxidable, el modo de provocar la oxidación, la naturaleza heterogénea y heterofásica del sistema y las interacciones con otros componentes.

Entre los métodos utilizados están el ABTS (reactivo 2,2-azinobis 3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico), el DPPH (reactivo 2,2-difenil-1-picrilhidracilo), el DMPD (reactivo dicloridrato de N, N-dimetilpfeñilendiamina) y el FRAP (poder antioxidante de reducción férrica); cuyos métodos emplean reactivos cromógenos que permiten estabilizar los radicales libres (Kuskoski et al., 2005). Otro método, el ORAC (capacidad de absorción de radicales de oxígeno) se basa en la inhibición del radical peroxil oxidativo inducido por composición térmica de compuestos 2,2-azobis (2-amidinopropano) diclorhidrato y en este método la capacidad antioxidante se cuantifica calculando la protección neta durante cierto tiempo de degradación de la fluorescencia de ficoeritrina o fluoresceína en presencia del antioxidante (Hernández, 2003).

Son diversos los estudios realizados en el tubérculo de papa para determinar la actividad antioxidante. Stushnoff et al. (2008) evaluaron las propiedades antioxidantes en 90 genotipos del programa de mejoramiento del estado de Colorado. Los genotipos con piel y carne roja y púrpura obtuvieron los más altos contenidos de fenoles totales, ácido gálico, capacidad antioxidante y ácido clorogénico. Los tubérculos asados presentaron los niveles más bajos de fenoles totales, capacidad antioxidante, vitamina C, ácido gálico, ácido clorogénico y glicoalcaloides; comparados con tubérculos crudos y tubérculos cocidos en microondas y en agua. Keutgen et al. (2019) evaluaron la capacidad antioxidante medida por FRAP en tres cultivares de *Solanum tuberosum* L., y la correlacionaron con el contenido de ácido clorogénico y fracciones de glutatión que inhiben los radicales libres.

Para genotipos diploides, Berdugo-Cely et al. (2023) reportaron mayores contenidos de capacidad antioxidante por FRAP y por DPPH para genotipos de coloración rosa-rojo que ostentan rasgos cuantitativos asociados a estas variables. En otro estudio de López-Rodríguez y Núñez-López (2020), se determinó la actividad antioxidante por los métodos *in vitro* ABTS y FRAP para genotipos diploides y observaron un efecto significativo de la fertilización con magnesio en el cultivar Criolla Colombia. También estudiaron genotipos diploides Molina et al. (2015) y determinaron capacidad antioxidante por FRAP y por DPPH en tubérculos precocidos que retuvieron compuestos antioxidantes y en tubérculos congelados que presentaron afectación en el contenido de la actividad antioxidante.

## 1.6 Fenoles totales

Los fenoles están asociados al color, a las características sensoriales, a las características nutritivas y a las propiedades antioxidantes de los alimentos. Las coloraciones azules, azul-violeta, rojo, morado en la papa se debe a su contenido fenólico (Robbins, 2003; Kähkönen et al., 1999); por ello, se les ha realizado diversos estudios sobre la actividad antioxidante *in vitro*, demostrando sus propiedades antibacterianas, antivirales, anticancerígenas y antiinflamatorias (Duthie et al., 2000). Los polifenoles se reconocen como los más abundantes en nuestra dieta y la papa se considera la tercera fuente más importante de fenoles después de las manzanas y naranjas (Chun et al., 2005).

Las plantas vasculares como la papa sintetizan una gran cantidad de moléculas orgánicas como consecuencia de su metabolismo secundario. Los compuestos fenólicos o polifenoles son considerados metabolitos secundarios de las plantas, necesarios para el crecimiento y desarrollo de estas (Szajdek y Borowska, 2008). Los fenoles son producidos a través de la vía fenilpropanoide y sus características antioxidantes se deben a la reactividad del grupo fenol (Navarre et al., 2010; Vogt, 2010). Los fenoles protegen a las plantas contra los daños oxidativos y la misma función se ejerce en el organismo humano (Duthie et al., 2000), por ello, los cultivos alimentarios que son fuente de nutrientes que favorecen la salud humana se les denomina alimentos funcionales, definición que la Academia Nacional de Ciencia de los Estados Unidos es dado a cualquier alimento o ingrediente que proporcione un beneficio para la salud superior al

que aportan los nutrientes tradicionales que lo contengan (Peninnton, 2002). También se les llama: productos nutracéuticos, fitonutrientes, prebióticos, probióticos y alimentos superiores (Xu, 2001). Estos fitonutrientes incluyen un gran número de compuestos que intervienen como agentes preventivos de enfermedades (Goyer y Navarre, 2009).

Los tubérculos de papa (carne y piel) contienen sustancias antioxidantes, no obstante, se ha demostrado que la mayoría de los compuestos fenólicos se encuentran en la piel, siendo mayoritariamente derivados del ácido cafeico y ácido ferúlico, lo que estimula el aprovechamiento de este subproducto en la industria alimentaria (Akyol et al., 2016). Las variedades de papa pigmentadas de colores púrpura y roja en la carne y/o piel pueden llegar a contener el doble de la concentración de ácidos fenólicos, principalmente ácido clorogénico, en comparación con variedades de piel o carne blanca o amarilla (Rosenthal y Jansky, 2008; Ezekiel et al., 2013; López-Rodríguez y Núñez- López, 2020).

La papa es fuente de fenoles, los que afectan el ennegrecimiento del tubérculo y pueden causar un deterioro durante el almacenamiento o procesamiento. Aun así, los fenoles presentes en la papa y especialmente los de su piel, tienen efectos benéficos sobre la salud porque expresan la actividad antioxidante. El ácido clorogénico es reportado como una sustancia que inhibe procesos relacionados con la iniciación de cáncer. Los fenoles de la papa, legumbres y cereales reducen los niveles de glucosa presentes en la sangre, demostrado esto con las pruebas de laboratorio que el ácido clorogénico y otros fenoles tienen actividad antioxidante sobre las lipoproteínas que se relacionan directamente con enfermedades cardíacas (Zaragoza et al., 2004; Soto-Vásquez et al., 2014). En papa los compuestos fenólicos totales están determinados principalmente por el genotipo, mientras que los compuestos fenólicos individuales son influenciados por el ambiente (André et al., 2009).

En papa de carne blanca los compuestos fenólicos como el ácido clorogénico constituyen el 80% de los ácidos fenólicos totales. Las papas nativas pigmentadas con antocianinas (pigmento fenólico) permiten que las células no sufran oxidación o que se mantengan en un equilibrio para los procesos de óxido-reducción que ocurren en forma natural dentro del organismo, lo cual previene enfermedades cardiovasculares, además, presentan efecto anticancerígeno (Ezekiel et al., 2013).

Los compuestos fenólicos presentes en papa incluyen: polifenoles, fenoles monohídricos, cumarinas, flavonas, taninos y lignina. También se encuentran los ácidos fenólicos como clorogénico, cafeico, protocatequeico y p-cumárico, entre otros (Hale et al., 2008). En tubérculos de carne roja y púrpura se han encontrado pequeñas cantidades de rutina, quercetina, miricetina, kaempferol, naringenina y otros flavonoides (Lewis et al., 1998). Reyes et al. (2004) determinaron que la cosecha de tubérculos en períodos de madurez tardía maximizó los rendimientos de compuestos fenólicos, mientras que el contenido de glicoalcaloides se minimizó. Se amplió la información de la investigación anterior con un estudio realizado en 1000 cultivares andinos de papa provenientes del Centro Internacional de la Papa (CIP) y se determinó que los ácidos fenólicos como el ácido clorogénico, representaron una gran proporción en todos los cultivares, entre el 45 y 90% del total del contenido de polifenoles (Andre et al., 2007).

Lewis et al. (1998) encontraron que la piel contenía de 2000-5000 mg/g de ácido fenólico y 200-300 mg de flavonoides. Los tubérculos de color piel roja y púrpura contienen el doble de la concentración de ácidos fenólicos que los tubérculos de piel blanca. La carne del tubérculo contiene concentraciones más bajas que van de 100-600 g de ácido fenólico y de 0-30 mg de flavonoides. Deuber et al. (2012) estudiaron el contenido de polifenoles y glicoalcaloides en variedades cultivadas de papa (*Solanum tuberosum* L.) y encontraron que los polifenoles decrecen desde la piel hacia el interior de la carne del tubérculo evidenciando diferencias entre los cultivares estudiados.

Mohdaly et al. (2010) evaluaron las propiedades antioxidantes en piel de papa como subproducto agroindustrial. La extracción de los compuestos fenólicos en metanol produjo el más alto rendimiento de 2,91 mg equivalentes de ácido gálico/g en base seca (BS). Otro estudio como el de Molina et al. (2015) sobre el contenido de fenoles totales en papa diploide precocida a 90 °C por 9 min, arrojó un valor de 981 equivalentes de ácido gálico/100 g de muestra, pero después de 60 días de congelación los fenoles totales disminuyeron entre 80 al 87%. En cuanto a genotipos diploides, Berdugo-Cely et al. (2023), determinaron fenoles totales en 84 genotipos con diversas coloraciones entre 189,4 a 2584,4 mg equivalentes de ácido gálico/100 g de muestra fresca, arrojando los valores más altos en genotipos rosa-rojo.

## 1.7 Vitamina C

Las plantas son la principal fuente de vitamina C en la dieta humana (Navarre et al., 2016). Esta vitamina es cofactor para muchas enzimas, funciona como donante de electrones, y tiene un papel importante en la desintoxicación de especies reactivas de oxígeno (Navarre et al., 2016). Hay dos principales formas de vitamina C: ácido  $\alpha$ -ascórbico (AA) y ácido  $\alpha$ -dehidroascórbico (DHAA). Los términos vitamina C y ácido ascórbico son utilizados frecuentemente como sinónimos. Esta vitamina juega un papel importante en la mejora de la biodisponibilidad del hierro (Nasolodin et al., 1996; Burgos et al., 2009; Ariza-Nieto et al., 2008) y previene la mutación del ADN inducido por estrés oxidativo (Lutsenko et al., 2002; Collins, 2004).

La planta de papa en sus hojas, tallos y tubérculos sintetizan la vitamina C (Tedone et al., 2004; Viola et al., 1998). Más allá del suministro de energía y proteínas de buena calidad, la papa es una fuente importante de vitaminas y minerales. Sin embargo, su valor dentro de la dieta humana y el aporte de vitamina C ha sido subestimado (Dale et al., 2003). Las papas contienen 30 mg o más de ácido ascórbico/100 g cuando son recién cosechadas (Verdu, 2005), pero este valor disminuye cuando la papa es almacenada, cocida o procesada. La papa cocida pierde entre un 18-24% de vitamina C a través de su piel y la pérdida sería mayor (35%-50%) si no estuviera la piel adherida al tubérculo. Incluso con esta pérdida, la vitamina C en el tubérculo cocido es aprovechable, es decir, 150 g de papa proporciona cerca del 40% de los requerimientos necesarios de esta vitamina. Al deshidratar la papa se pierde la vitamina C en un gran porcentaje y en papa almacenada la pérdida puede ser entre 50-60% luego de tres meses de almacenamiento (Lister y Munro, 2000). En tubérculos de carne blanca se ha obtenido 20 mg de vitamina C /100 g de papa fresca, que pueden representar hasta el 13% de la capacidad antioxidante total (Brown, 2005).

La papa cocida se considera como un alimento que contiene importantes componentes nutricionales como minerales, fibra dietética, vitamina C y almidones de digestión rápida que favorece el índice glicémico (Xu et al., 2009). Burgos et al. (2009) evaluaron la concentración de ácido ascórbico en cocción y el tiempo de almacenamiento en 25 variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) de los Andes y cultivadas en tres localidades. Encontraron variación significativa entre los genotipos, el ambiente y la

interacción genotipo por ambiente respecto a la concentración de ácido ascórbico en tubérculos recién cosechados. La concentración de ácido ascórbico fue mayor en tubérculos cocidos en hornos microondas y se disminuyó con el tiempo de almacenamiento.

Lachman et al. (2008) evaluaron 6 cultivares de papa en 6 localidades, donde encontraron diferencias significativas en la actividad antioxidante para los cultivares de carne de colores amarillo y carne morada con valores de 139,3 y de 332,3 mg de ácido ascórbico/kg de materia seca, respectivamente. Rivadeneira et al. (2016) determinaron a 14 genotipos ecuatorianos el contenido de vitamina C, la cual presentó variación entre los tubérculos con un promedio de 84,23 mg de vitamina C/100 g de muestra fresca. Tatarowska et al. (2023) reportaron para 65 cultivares de papa procedentes de Europa, contenidos entre 1,0 a 14,8 mg de vitamina C/100 g de muestra fresca. Los genotipos con carne amarilla arrojaron valores más altos de vitamina C (6,5 mg/100 g en papa fresca) que los de carne blanca (5,8 mg/100 g en papa fresca).

Sin embargo, la vitamina C se degrada en procesos que interviene la temperatura debido a su característica termolábil y, además, se disminuye en alimentos con permanente actividad acuosa. García-Torres et al. (2022) lo demuestra en la comparación del contenido de vitamina C en muestra fresca y en hojuela freída de la variedad nativa Puka Ambrosio que presenta pigmentaciones moradas en el haz vascular y en la médula, hallando una reducción de la vitamina C de 26,8 mg/100 g de papa fresca BS a 16,5 mg/100 g de hojuela frita BS. Molina et al. (2015) trabajaron en muestras precocidas y congeladas de tres genotipos diploides y encontraron disminución de vitamina C en estos procesos. Los genotipos precocidos estuvieron entre 48 a 57 mg/100 g BH y después de 60 días de congelación los genotipos estuvieron entre 26 a 44 mg/100 g BH.

## **1.8 Interacción genotipo por ambiente**

La interacción genotipo por ambiente (GxA) explica los diferentes comportamientos que suceden en los genotipos cuando son sometidos a diversos ambientes (Falconer, 1981). La respuesta de un genotipo en un ambiente dado puede cambiar si se lo lleva a otro ambiente diferente. Para la determinación de la interacción GxA, los genotipos deben ser

evaluados en diferentes localidades, años e incluso épocas (Márquez-Vasallo et al., 2020; Wissar, 1994).

Para las entidades NU.CEPAL, FAO e IICA (2021), la menor disponibilidad de insumos prevista para el futuro y la expansión de las fronteras agrícolas hacia ambientes marginales, enfrentan a los programas de mejoramiento a la búsqueda de nuevos cultivares para sistemas de producción más heterogéneos de tipo estacional y espacial. La interacción GxA explica una proporción de la variación del rendimiento debida al efecto genotípico; lo que a veces complica el proceso de selección (Cooper y Byth, 1996).

El desafío para el mejorador es poder descomponer las interacciones que suceden en los ambientes objetivos en componentes y que las interacciones sean repetibles para seguir con su investigación, con lo que se obtiene un método de selección que beneficie el progreso genético para rendimiento y para los caracteres asociados a la adaptación de los factores ambientales (Lagos-Burbano, 2023; Vásquez et al., 2019).

La estabilidad fenotípica propende por identificar genotipos cuyo comportamiento frente a condiciones ambientales adversas de tipo biótico y abiótico responden favorablemente a los parámetros de rendimiento. Los genotipos promisorios identificados con estabilidad fenotípica pueden satisfacer las demandas del sector primario y de los consumidores tanto en fresco como en procesamiento agroindustrial. La variabilidad genética y la interacción genotipo por ambiente son componentes fundamentales para determinar el grado de estabilidad fenotípica en los cultivares de papa (Vásquez et al., 2019).

La estabilidad y la adaptabilidad de cultivares de papa en diferentes ambientes se estiman con diferentes modelos. Uno de ellos es el análisis de sendero que consiste en interpretar el efecto que una característica de importancia agronómica tiene sobre otra y los efectos casuales de otras características relacionadas; esta interpretación, es la base para el establecimiento de criterios de selección indirecta entre las variables de importancia agronómica y otras casuales (Lagos-Burbano, 2023). Otro es el modelo AMMI (efectos principales aditivos e interacciones multiplicativas), que se emplea para evaluar las características agronómicas como el rendimiento y otras variables de interés. En este modelo se integra el análisis de varianza de los efectos principales de los

genotipos y de los ambientes con el análisis de componentes principales de la interacción GxA, para posteriormente graficar los resultados en un biplot que reúne los efectos principales con los efectos de interacción para los genotipos y los ambientes (Vargas-Escobar et al., 2016).

Uno de los aspectos a tener en cuenta para favorecer los contenidos nutraceuticos en especies vegetales es la influencia del ambiente en la expresión de estos caracteres (André et al., 2007). La evaluación de los genotipos en diferentes localidades permite estimar su respuesta bajo diversas condiciones ambientales. De aquí la gran importancia de los estudios de la interacción GxA y la estabilidad fenotípica en el mejoramiento genético de papa (Bonierbale et al., 2004).

Estudios realizados entre el CIP y el INIA-Chile aplicaron el modelo AMMI y demostraron que existe alta diversidad genética para seleccionar progenies por adaptación a días largos y para identificar genotipos con amplia adaptación; el modelo es valioso pues con la evaluación de la interacción GxA se puede explotar la adaptación específica (Bonierbale et al., 2004). Parga et al. (2005) determinaron la interacción GxA en seis localidades para cuatro clones y dos variedades comerciales de papa. Dos clones presentaron similitud en sus características agronómicas, de calidad y de interacción GxA.

Se ha encontrado que la actividad antioxidante, los fenoles totales y los carotenoides totales presentan diferencias significativas para genotipos, localidad y el año de evaluación. Además, se reporta que la actividad antioxidante tuvo correlación significativa entre los fenoles totales y el contenido de ácido clorogénico (Reddivari et al., 2007). Rosenthal y Jansky (2008) evaluaron la actividad antioxidante de 14 clones de papa en 4 localidades de producción: dos convencionales y dos orgánicos (17-19 días después de la cosecha), los tubérculos fueron almacenado a 5,6 °C y 95% de humedad relativa durante 5,5 meses en 2 años de experimentación. Los mayores niveles de antioxidantes se presentaron en las localidades donde se manejó por el tipo convencional y bajo el sistema de almacenamiento.

André et al. (2009) realizaron la investigación con 13 genotipos de papa nativa en dos localidades (Huancayo y Huancani- Perú) para determinar la influencia del medio

ambiente y la genética en el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante hidrofílica (H-ORAC). Las condiciones ambientales afectaron significativamente el contenido de fenoles totales y los compuestos fenólicos individuales, mientras que el perfil químico se mantuvo estable en las dos condiciones ambientales; sin embargo, el genotipo fue el factor más determinante de las variaciones observadas.

De Haan et al. (2012) evaluaron cuatro genotipos de papa amargas nativas en tres zonas de producción para la elaboración de chuño y los contenidos de minerales. Obtuvieron que las concentraciones de materia seca, hierro, calcio y magnesio en el chuño blanco dependen del ambiente, de los genotipos, del proceso de elaboración y de las interacciones de los mismos. Los contenidos de materia seca están influenciados por los posibles efectos de interacción. El zinc y el potasio no dependen de las interacciones. El fósforo no es afectado significativamente por las variables analizadas. El zinc, el fósforo y el magnesio disminuyeron entre 48,3-81,5%; 61,2-73,0% y 62,0-89,7% respectivamente. La disminución en potasio fue de 122 a 330 veces. El hierro y el calcio aumentaron de 11,2-45,6% y 74,5-714,9% en su orden.

En estudios de estabilidad fenotípica en 11 cultivares de papa con tubérculos de carne pigmentada, Tirado et al. (2018) reportaron que la mayor contribución a la variación total en el rendimiento de tubérculo fue el de la interacción GxA (60,82%). El efecto del genotipo fue 26,03% y el de los ambientes fue de 13,15%.

## 1.9 Rendimiento de cultivares de papa

Uno de los parámetros agronómicos más importante en el cultivo de papa es el rendimiento en las categorías comerciales, que para Colombia fueron establecidas por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2015). El rendimiento es afectado por las condiciones ambientales y su efecto depende de la fase fenológica en que se encuentre el cultivo y la intensidad del estrés. Es importante anotar que el rendimiento está correlacionado con la disponibilidad del agua durante el desarrollo del cultivo, pero, las fases más sensibles que afectan el rendimiento son la emergencia y la tuberización. Así mismo, se afecta el rendimiento cuando el estrés se presenta en el inicio de la formación de estolones y cuando hay una defoliación de hojas mayor al 50% (Barbosa, 2011; Mamani, 2000; Schafleitner et al, 2007). Todo lo anterior, se tiene en cuenta para el

rendimiento pues de este se derivada el nivel de ingreso de los agricultores productores del tubérculo.

Lizarazo-Peña et al. (2022) realizaron un estudio con cinco cultivares de papa diploide en Colombia, evaluando el efecto de la altitud de 2300, 2700 y 3200 msnm en el rendimiento. En la localidad baja la productividad de Criolla Ocarina, Paola y Violeta se afectó negativamente, mientras que las localidades con mayor altitud favorecieron el rendimiento de todos los genotipos. Concluyeron, que antes de la siembra se debe conocer las características agronómicas de los cultivares más sus atributos para establecerlos en zonas particulares, con el fin de potenciar el rendimiento y la calidad del tubérculo de papa diploide producido.

López et al. (2014) evaluaron el efecto de la aplicación edáfica de sulfato de zinc granulado (0, 1, 2 y 3 kg.ha<sup>-1</sup>), comparado con la aplicación foliar de quelato de EDTA de zinc (0, 1, 2 y 3 kg.ha<sup>-1</sup>), sobre el potencial del rendimiento de la variedad Criolla Colombia. Los resultados mostraron aumentos del 136% en el rendimiento de tubérculos categoría grande y del 68% para el peso total de tubérculos con 3 kg.ha<sup>-1</sup> de aplicación edáfica de sulfato de zinc granulado.

Rodríguez et al. (2009) evaluaron nueve clones de papa diploide por variables del rendimiento del tubérculo en campo y su estabilidad fenotípica. El estudio condujo a la selección de tres clones superiores que fueron registrados en el año 2005 como nuevos cultivares: Criolla Latina, Criolla Paisa y Criolla Colombia, con atributos para el consumo en fresco y elaboración de productos procesados.

Rivadeneira et al. (2016) realizaron estudios de rendimiento en 9 genotipos de papa (*Solanum sp.*) procedentes del programa de mejoramiento genético y 5 variedades comerciales como testigos, establecidos en cuatro ambientes de la Sierra de Ecuador. Dos variedades testigos y un genotipo promisorio 98-2-6 sobresalieron en su rendimiento con promedios superiores a 43 t.ha<sup>-1</sup>, de igual manera, los ambientes de Chiquicha, Tunshi y Cutuglahua fueron superiores a 40 t.ha<sup>-1</sup> de producción en los genotipos y las variedades comerciales en evaluación.

En estudios de rendimientos para genotipos diploides, Seminario-Cunya et al. (2018) evaluaron el rendimiento total y comercial de 15 cultivares del Grupo Phureja establecidos en Cajamarca (Perú). Se encontraron diferencias altamente significativas para los parámetros de rendimiento como: número y peso de tubérculos comerciales, y número total de tubérculos. Sobresaliendo por rendimiento los cultivares blanca amarilla y Limeña Guachuma con valores por encima de 27 t.ha<sup>-1</sup>.

Los estudios mencionados confirman que los efectos de factores bióticos y abióticos inciden en los rendimientos, dependiendo del efecto genotípico.

## 1.10 Bibliografía

- Agronet. (2022). Reporte: área, producción y rendimiento nacional por cultivo. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Akyol, H., Riciputi, Y., Capanoglu, E., Caboni, M.F., Verardo, V. (2016). Phenolic Compounds in the Potato and Its Byproducts: An Overview. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(6), 835. <https://doi.org/10.3390/ijms17060835>
- Al-Saikhan, M.S., Howard, L.R., Miller JR, J.C. (1995). Antioxidant activity and total phenolics in different genotypes of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Food Science*, 60,341-343. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb05668.x>
- André, C.M., Oufir, M., Hoffmann, L., Hausman, J.F., Rogez, H., Larondelle, Y., Evers, D. (2009). Influence of environment and genotype on polyphenol compounds and in vitro antioxidant capacity of native Andean potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 22(6), 517-524. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.11.010>.
- Andre, C.M., Ghislain, M., Bertin, P., Oufir, M., Herrera, M.R., Hoffmann, L., Hausman, J.F., Larondelle, Y., Evers, D. (2007). Andean potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) as a source of antioxidant and mineral micronutrients. *Agric. Food Chem.* 55(2):366-378. doi: 10.1021/jf062740i PMID: 17227067.
- Ariza-Nieto, M., Burgos, G., Bonierbale, M., Rutzke, M., Welch, R., Glahn, R. (2008). In vitro Fe bioavailability in Potato (*Solanum tuberosum* L.). *The FASEB Journal*. 21:858.3.

- Avilés-Chaves, J., Piedra-Naranjo, R. (2017). *Cultivo de la papa (Solanum tuberosum L.)*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA]. Costa Rica. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10931.pdf>
- Barbosa, E. (2011) Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Archivo Digital. [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/22219/65055\\_65013.pdf?s equence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/22219/65055_65013.pdf?s equence=1&isAllowed=y)
- Barona, D., Mateus-Rodríguez, J., Montesdeoca, F. (2015). La planta de papa: ecofisiología y nutrición mineral. En: J.L. Andrade-Piedra, P. Kromann y V. Otazú (Eds.), *Manual para la Producción de Semilla de Papa usando Aeroponía: Diez años de Experiencias en Colombia, Ecuador y Perú* (pp. 109-130). Centro Internacional de la Papa (CIP), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).
- Berdugo-Cely, J.A., Céron-Lasso, M.S., Yockteng, R. (2023). Phenotypic and molecular analyses in diploid and tetraploid genotypes of *Solanum tuberosum* L. reveal promising genotypes and candidate genes associated with phenolic compounds, ascorbic acid contents, and antioxidant activity. *Front Plant Sci*, 18(13):1007104. doi: 10.3389/fpls.2022.1007104
- Bianchi, V.E., Falcioni, G. (2016). Reactive oxygen species, health and longevity, *AIMS Molecular Science*, 3(4), 479-504. <https://doi.org/10.3934/molsci.2016.4.479>
- Bonierbale, M., Zapata, G.B., Felde, T., Sosa, P. (2010). Composition nutritionnelle des pommes de terre. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 45(6), 28-36
- Bonierbale, M., Amorós, W., Espinoza, J., Mihovilovich, E., Roca, W., Gómez, R. (2004). Recursos Genéticos de la papa, don del pasado, legado para el futuro. Suplemento *Revista Latinoamericana de la Papa*. Valdivia Chile: p: 3-14
- Bonilla, M., Cardozo, F., Morales, A. (2009). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la papa en Colombia con énfasis en papa criolla*. Bogotá D.C. Giro Editores, 173 P.
- Brar, A., Bhatia, A.K., Pandey, V., Kumari, P. (2017). Biochemical and Phytochemical Properties of Potato: A Review. *Chemical Science Review and Letters*, 6(21), 117-129. [https://chesci.com/wp-content/uploads/2017/01/V6i21\\_27\\_CS182048013\\_Archana\\_117-129.pdf](https://chesci.com/wp-content/uploads/2017/01/V6i21_27_CS182048013_Archana_117-129.pdf)

- Brown, C.R. (2005). Antioxidants in potato. *Amer. J. Potato Res.* 82, 163–172. <https://doi.org/10.1007/BF02853654>
- Bukasov, S.M. (1971). Cultivated potato species. pp. 5-40. En: Bukasov, S.M. (ed.). *Flora of cultivated plants*. Vol. 9. Kolos, Leningrad, Rusia.
- Burgos, G., Amoros, W., Salas, E., Muñoa, L., Sosa, P., Cayhualla, E., Sánchez, C., Díaz, C., Bonierbale, M. (2013). Total phenolic, total anthocyanin and phenolic acid concentrations and antioxidant activity of purple-fleshed potatoes as affected by boiling. *Journal of Food Composition and Analysis*, 30(1), 6–12. <https://cgspace.cgiar.org/items/a46158df-ff1f-4ae1-b502-8aad4393d755>
- Burgos, G., Auqui, S., Amoros, W., Salas, E., Bonierbale, M. (2009). Ascorbic acid concentration of native Andean potato varieties as affected by environment, cooking and storage. *Journal of Food Composition and Analysis*. 22 (6), 533–538 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0889157508001415>
- Burlingame, B., Mouillé, B., Charrondieré, R. (2009). Nutrients, bioactive non-nutrients and anti-nutrients in potatoes. *Journal of Food Composition and Analysis* 22, 494–502 <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.09.001>
- Centro Internacional de la Papa (CIP). (2023). Datos y cifras de la papa. Recuperado de <https://cipotato.org/es/potato/potato-facts-and-figures/>
- Chun, O.K., Kim, D.O., Smith, N., Schroeder, D., Han, J.T., Lee, C.Y. (2005). Daily consumption of phenolics and total antioxidant capacity from fruit and vegetables in the American diet. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 1715–1724. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2176>
- Collins, A.R. (2004). Oxidative DNA damage: The link with fruit and vegetables. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 15(2),23-26
- Cooper, M., Byth, D. (1996). Understanding plant adaptation to achieve systematic applied crop improvement, a fundamental challenge. En: Cooper, M. y Hammer, G. (Eds.), *Plant adaptation and crop improvement*, CABI publishing, Wallingford, UK, 5-23 pp.
- D'Amelia, V., Sarais, G., Fais, G., Dessì, D., Giannini, V., Garramone, R., Carputo, D., Melito, S. (2022). Biochemical Characterization and Effects of Cooking Methods on Main Phytochemicals of Red and Purple Potato Tubers, a Natural Functional Food. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(3), 384. <https://doi.org/10.3390/foods11030384>
- Dale, M.F.B., Griffiths, D.W., Todd, D.T. (2003). Effects of genotype, environment, and postharvest storage on the total ascorbate content of potato (*Solanum tuberosum*) tubers. *J. Agri. Food Chem.* 51(1):244-8. doi: 10.1021/jf020547s. PMID: 12502415.

- De Haan, S., Burgos, G., Ccanto, R., Arcos, J., Scurrah, M., Salas, E., Bonierbale, M. (2012). Effect of production environment, genotype and process on the mineral content of native bitter potato cultivars converted into white chuño. *J Sci Food Agric.* 92(10):2098-105. doi: [10.1002/jsfa.5589](https://doi.org/10.1002/jsfa.5589)
- Deuber, H., Guignard, C., Hoffmann, L., Evers, D. (2012). Polyphenol and glycoalkaloid contents in potato cultivars grown in Luxembourg. *Food Chemistry*, 135, 2814–2824 doi: [10.1016/j.foodchem.2012.07.028](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.07.028)
- Dodds, K.S., Paxman, G.J. (1962). The genetic system of cultivated diploid potatoes. *Evolution*, 154-167.
- Duthie, G.G., Duthie, S.J., Kyle, J.A. (2000). Plant polyphenols in cancer and heart disease: implications as nutritional antioxidants. *Nutr Res Rev.* 13(1):79-106. doi: [10.1079/095442200108729016](https://doi.org/10.1079/095442200108729016). PMID: 19087434.
- Egúsqüiza, B.R. (2000). *La papa: producción, transformación y comercialización*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.  
[https://books.google.com.co/books?id=6ciGbBX0uFwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=6ciGbBX0uFwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Ezekiel, R., Singh, N., Sharma, S., Kaur, A. (2013). Beneficial phytochemicals in potato - A review. *Food Research International*, 50(2), 487-496.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.04.025>
- Falconer, D.S. (1981). *Introduction to Quantitative Genetics*. 2nd Edition, Longman Group Ltd., London, 1-133.
- FAO, FIDA, OPS, WFP y UNICEF. (2020). Panorama de la seguridad alimentaria y nutrición en América Latina y el Caribe 2020. Santiago de Chile.  
<https://doi.org/10.4060/cb2242es>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO-FAOSTAT]. (2022). *La Papa: Una aliada clave de la seguridad alimentaria*.  
<https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO-FAOSTAT]. (2012). *La Papa: una aliada clave de la seguridad alimentaria*.  
<http://www.rlc.fao.org/es/agricultura/produ/papa.htm>
- García-Torres, S.M., Chire-Fajardo, G.C., Repo-Carrasco, R., Ureña-Peralta, M.O. (2022). Effect of frying on the bioactive components of the native potato (*Solanum tuberosum* sp.) Puka Ambrosio. *Revista chilena de nutrición*, 49(1), 7-16. <https://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182022000100007>

- Garnica, A.M., Prieto, L., Álvarez, C.P., Poveda, J.C., Cerón, M.S., Molina, Y. (2022). Análisis físico y nutricional de tubérculos de papa diploide (*Solanum phureja* Juz. et Buk.). En: M.S. Cerón, L. Prieto, A.M. Garnica y J. Gabriel Ortega (Eds.), *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia* (pp. 357-390). Editorial Grupo Compás. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/37999>
- Gibbs, A. J., Ohshima, K., Yasaka, R., Mohammadi, M., Gibbs, M. J., Jones, R.A.C. (2017). The phylogenetics of the global population of potato virus Y and its necrogenic recombinants. *Virus evolution*, 3(1), vex002. <https://doi.org/10.1093/ve/vex002>
- Goufo, P., Trindade, H. (2014). Rice antioxidants: phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols, tocotrienols,  $\gamma$ -oryzanol, and phytic acid. *Food science and nutrition*, 2(2), 75–104. <https://doi.org/10.1002/fsn3.86>
- Goyer, A., Navarre, D.A. (2009). Vitamin B9 is higher in developmentally younger potato tubers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89, 579–583.
- Greuter, W., McNeill, J., Barrie, F.R., Burdet, H.-M., Demoulin, V., Filgueiras, T.S., P.M., Nicolson, D.H., Silva, P.C., Skog, J.E., Trehane, P. Turland, N.J., Hawksworth, D.L. (2000) International Code of Botanical Nomenclature (St. Louis Code). *Regnum Vegetabile*, 138(474), + xviii p.
- Hale, A., Reddivari, L., Nzaramba, M., Bamberg, J. (2008). Interspecific Variability for Antioxidant Activity and Phenolic Content Among *Solanum* Species. *American Journal of Potato Research*, 85 (5), 332-341  
<https://doi.org/10.1007/s12230-008-9035-1>
- Halliwell, B. (2006). Reactive Species and Antioxidants. Redox Biology Is a Fundamental Theme of Aerobic Life. *Plant Physiology*, 141(2), 312-322.  
<https://doi.org/10.1104/pp.106.077073>
- Hardigan, M. A., Laimbeer, F.P.E., Newton, L., Crisovan, E., Hamilton, J.P., Vaillancourt, B., Wiegert-Rininger, K., Wood, J.C., Douches, D.S., Farré, E.M., Veilleux, R.E., Buell, C.R. (2017). Genome diversity of tuber-bearing *Solanum* uncovers complex evolutionary history and targets of domestication in the cultivated potato. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(46), E9999–E10008. <https://doi.org/10.1073/pnas.1714380114>
- Hawkes, J.G. (1990). *The Potato: Evolution, Biodiversity and Genetic Resources*. Belhaven Press.
- Hernández, H. (2003). Antioxidantes en alimentos. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 4(4). <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=22990>

- Huamán, Z., Spooner, D.M. (2002). Reclassification of landrace populations of cultivated potatoes (*Solanum* sect. *Petota*). *American Journal of Botany*, 89(6), 947–965. <https://doi.org/10.3732/ajb.89.6.947>
- Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (2015). Resolución 003168. 7/09/2015. Reglamenta y controla la producción, importación y exportación de semillas producto del mejoramiento genético para la comercialización y siembra en el país, así como el registro de las unidades de evaluación agronómica y/o unidades de investigación en fitomejoramiento. ICA. MINAGRICULTURA. Colombia. <https://www.ica.gov.co/getattachment/4e8c3698-8fcb-4e42-80e7-a6c7acde9bf8/2015R3168.aspx>
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar [ICBF]. (2018). Tabla de composición de alimentos colombianos. Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF) y Universidad Nacional de Colombia. [https://www.icbf.gov.co/system/files/tcac\\_web.pdf](https://www.icbf.gov.co/system/files/tcac_web.pdf)
- Kähkönen, M.P., Hopia, A.I., Vuorela, H.J., Rauha, J.P., Pihlaja, K., Kujala, T.S., Heinonen, M. (1999). Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. *J Agric Food Chem.* 4(10):3954-62. doi: 10.1021/jf990146l. PMID: 10552749
- Keutgen, A.J., Wszelaczyńska, E., Pobereźny, J., Przewodowska, A., Przewodowski, W., Milczarek, D., Tatarowska, B., Flis, B., Keutgen, N. (2019). Antioxidant properties of potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) as a consequence of genetic potential and growing conditions. *PLoS One*, 14(9): e0222976. doi: 10.1371/journal.pone.0222976. PMID: 31553784; PMCID: PMC6760829.
- Kotikova, Z., Hejtmankova, A., Lachman, J., Hamouz, K., Trnkova, E., Dvorak, P. (2007). Effect of selected factors on total carotenoid content in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Soil Environment*, 53, 355–360 [https://pse.agriculturejournals.cz/artkey/pse-200708-0005\\_effect-of-selected-factors-on-total-carotenoid-content-in-potato-tubers-solanum-tuberosum-l.php](https://pse.agriculturejournals.cz/artkey/pse-200708-0005_effect-of-selected-factors-on-total-carotenoid-content-in-potato-tubers-solanum-tuberosum-l.php)
- Krist-Etherton, P.M., Hecker, K.D., Bonanone, A., Coval S.M., Binkoski, A.E., Hilpert, K.F., Griel, A.E., Etherton, T.D. (2002). Bioactive compounds in foods: Their role in the prevention of cardiovascular disease and cancer. *The American Journal of Medicine.* 113(9B), 71S-88S DOI: [10.1016/s0002-9343\(01\)00995-0](https://doi.org/10.1016/s0002-9343(01)00995-0)

- Kuskoski, E., Asuero, A., García, M., Troncoso, A., Fett, R. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 25 (4), 726-732 <https://www.scielo.br/j/cta/a/B58T9S5zLLxjBL5PVzZXHCF/#>
- Lachman, J., Hamouz, K., Orsák, M., Pivec, V., Dvorčák, P. (2008). The influence of flesh colour and growing locality on polyphenolic content and antioxidant activity in potatoes. *Scientia Horticulturae*, 117(2),109–114. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2008.03.030>.
- Lagos-Burbano, T.C. (2023). Análisis estadístico para el mejoramiento genético vegetal. Editorial Universitaria, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos – GPFA. [https://sired.udenar.edu.co/7672/2/vf4\\_2021\\_An%C3%A1lisis%20estad%C3%ADstic%C3%A9tico%20vegetal.pdf](https://sired.udenar.edu.co/7672/2/vf4_2021_An%C3%A1lisis%20estad%C3%ADstic%C3%A9tico%20vegetal.pdf)
- Lambert, J.D., Yang, C.S. (2003). Cancer chemopreventive activity and bioavailability of tea and tea polyphenols. *Mutat Res.* Feb-Mar;523-524:201-8. doi: 10.1016/S0027-5107(02)00336-6. PMID: 12628518.
- Lewis, C., Walker, J., Lancaster, J. (1998). Changes in anthocyanis, flavonoid and phenolic acid concentrations during development and storage of coloured potato (*Solanum tuberosum* L) tubers. *Science of Food and Agriculture*, 79 (2), 311-316
- Ligarreto, G.A., Suárez, M.N. (2003). Evaluacion del potencial de los recursos geneticos de papa criolla (*Solanum phureja*) por calidad industrial. *Agronomía Colombiana*, 21(1-2), 83-94. <https://www.redalyc.org/pdf/1803/180317942009.pdf>
- Lister, C.E., Munro, J. (2000). *Nutrition and health qualities of potatoes - a future focus*. New Zealand Institute for Crop & Food Research Limited Circulation of this report is restricted, vol. 143, 14-15
- Lizarazo-Peña, P.A., Moreno-Fonseca, L.P., Núñez-López, C.E. (2022). Rendimiento y variables poscosecha de cultivares de papa del grupo Phureja en ambientes contrastantes por altitud de la región Andina central de Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2). [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num2\\_art:2197](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2197)
- López, A., Gómez, M.I., Rodríguez, L.E. (2014). Efecto de la aplicación edáfica y foliar de zinc sobre el rendimiento del cultivar Criolla Colombia. *Agronomía Colombiana*, 32(1), 70-77. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/72658/38673-201985-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- López-Rodríguez, M.M., Núñez-López, C.E. (2020). Compuestos antioxidantes en papa diploide: Efecto de la aplicación foliar de magnesio y manganeso. *Agronomía Colombiana*, 38(3), 325–334. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v38n3.79629>
- Luján, L. (1991). *Morfología, estructura y fisiología de la planta de papa*. Bogotá, Colombia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/16934>
- Lutsenko, E.A., Carcamo, J.M., Golde, D.W. (2002). Vitamin C prevents DNA mutation induced by oxidative stress. *Journal of Biological Chemistry*, 277: 16895-16899
- Mamani, P. (2000). *Effect de la secheresse sur six variétés de pomme de terre dans les andes boliviennes*. [Tesis de Maestría]. Université Catholique de Louvain.
- Márquez-Vasallo, Y., Salomón-Díaz, J.L., Acosta-Roca, R. (2020). Análisis de la interacción genotipo ambiente en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Cultivos Tropicales*, 41(1), e10. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362020000100010&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000100010&lng=es&tlng=es)
- Mihovilovich, E., Sanetomo, R., Hosaka, K., Ordoñez, B., Aponte, M., Bonierbale, M. (2015). Cytoplasmic diversity in potato breeding: case study from the International Potato Center. *Molecular Breeding* 35,137. <https://doi.org/10.1007/s11032-015-0326-1>
- Mohdaly, A.A., Sarhan, M.A., Smetanska, I., Mahmoud, A. (2010). Antioxidant properties of various solvent extracts of potato peel, sugar beet pulp and sesame cake. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90,218–226
- Molina, Y., Rabe, G., Rodríguez, M.L., Cerón, M.S., Garnica, A.M. (2015). Contenido de antioxidantes en papas criollas nativas (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) en procesos de precocción y congelación. *Alimentos Hoy*, 23(36): 31-41. <https://alimentos hoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/341>
- Morris, W.L., Ducreux, L., Griffiths, D.W., Stewart, D., Davies, H.V., Taylor, M.A. (2004). Carotenogenesis during tuber development and storage in potato. *Journal of Experimental Botany*, 55, 975–982
- Naciones Unidas-Comisión Económica para América Latina y el Caribe [NU.CEPAL], Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA]. (2021). *Perspectivas de la Agricultura y del Desarrollo Rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2021-2022*. San José, Costa Rica: IICA. <https://hdl.handle.net/11362/47208>

- Nara, K., Miyoshi, T., Honma, T., Koga, H. (2006). Antioxidative activity of bound form phenolics in potato peel. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 70,1489–1491.
- Nasolodin, V.V., Rusin, V.Y., Dvorkin, V.A., Shipov, N.A., Gulevskaya, G.V. (1996). Interrelationship between vitamin C and trace elements and their role in the prevention of iron-deficiency conditions - a review. *Gigiena i Sanitariya*, 6: 26-29
- Navarre, D., Shakya, R., Holden, J., Kumar, S. (2010). The effect of different cooking methods on phenolics and vitamin c in developmentally young potato tubers. *American Journal of Potato Research*, 87(4), 350-359.
- Navarre, R., Shakya, R., Hellmann, H. (2016). Chapter 6. Vitamins, Phytonutrients, and Minerals in Potato. En J. Singh y L. Kaur (Eds.), *Advances in Potato Chemistry and Technology* (pp.117-166). Academic Press.
- Ñústez-López, C.E. (2011). *Estudios fenotípicos y genéticos asociados a la calidad de fritura en Solanum phureja* Juz et Buk. [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional-Universidad Nacional de Colombia.
- Ochoa, C.M. (1999). *Las papas de Sudamérica*. Centro Internacional de la Papa, Lima.
- Ochoa, C.M. (1990). *The potatoes of South America: Bolivia*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Parga, M., Zamora, V., González, V., Gracia, S., Villavicencio, E. (2005). Interacción genotipo por ambiente en clones de papa bajo riego en el noreste de México. *Agricultura Técnica en México*. 31(1), 55-64
- Peninnton, J.A.T. (2002). Food composition databases for bioactive food components. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15(4), 419-434. <https://doi.org/10.1006/jfca.2002.1073>.
- Pérez, L.C., Rodríguez, L.E., Gómez, M.I. (2008). Efecto del fraccionamiento de la fertilización con N, P, K y Mg y la aplicación de los micronutrientes B, Mn y Zn en el rendimiento y calidad de papa criolla variedad Criolla Colombia. *Agron. Colomb.* 26(3), 477-485
- Reddivari, L., Hale, A.L., Miller, J.C. (2007). Determination of Phenolic Content, Composition and their Contribution to Antioxidant Activity in Specialty Potato Selections. *American Journal of Potato Research*, 84 (4), 275-282. <https://doi.org/10.1007/BF02986239>
- Reinoso, I., Thiele, G. (2005). *Las Papas nativas en el Ecuador: Estudios cualitativos sobre oferta y demanda*. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, Centro

- Internacional de la Papa, Agenda Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. Quito, Ecuador, p. 7.
- Reyes, L.F., Miller, J.C., Cisneros-Zevallos, L. (2005). Antioxidant capacity, anthocyanins and total phenolics in purple and red-fleshed potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes. *American Journal of Potato Research*, 82, 271-277. <https://doi.org/10.1007/BF02871956>
- Reyes, L.F., Miller, J.C., Cisneros-Zevallos, L. (2004). Environmental conditions influence the content and yield of anthocyanins and total phenolics in purple- and red-flesh potatoes during tuber development. *American Journal of Potato Research*, 81, 187-193. <https://doi.org/10.1007/BF02871748>
- Rivadeneira, J., Ortega, D., Morales, V., Monteros, C., Cuesta, X. (2016). Efecto de la interacción genotipo por ambiente sobre los contenidos de hierro, zinc y vitamina c en genotipos de papa (*Solanum* sp.). *Revista Latinoamericana de la Papa*, 20 (1): <http://ojs.papaslatinas.org/index.php/rev-alap/article/view/242/247>
- Robbins, R.J. (2003). Phenolic acids in foods: an overview of analytical methodology. *J Agric Food Chem*. 51(10):2866-87. doi: 10.1021/jf026182t. PMID: 12720366
- Rodríguez, L.E., Núñez, C.E., Estrada, N. (2009). Criolla Latina, Criolla Paisa y Criolla Colombia, cultivares de papa criolla para el Departamento de Antioquia (Colombia). *Agronomía Colombiana*. 27(3), 289-303.
- Rodríguez de Sotillo, D., Hadley, M., Holm, E.T. (1994). Phenolics in aqueous potato peel extract: extraction, identification and degradation. *Journal of Food Science*, 59,649–651
- Rojas-Barquera, D., Narváez-Cuenca, C.E. (2009). Determinación de vitamina C, compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante de frutas de guayaba (*Psidium guajava* L.) cultivadas en Colombia. *Quim. Nova*, 32(9), 2336-2340
- Rosenthal, S., Jansky, S. (2008). Effect of production site and storage on antioxidant levels in specialty potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 88(12), 2087-2092. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3318>
- Schafleitner, R., Gutiérrez, R., Espino, R., Gaudin, A., Pérez, J., Martínez, M., Domínguez, A., Tincopa, L., Alvarado, C., Numberto, G., Bonierbale, M. (2007). Field screening for variation of drought tolerance in *Solanum tuberosum* L. by agronomical, physiological and genetic analysis. *Potato Research*, 50(1), 71–85. doi: 10.1007/s11540-007-9030-9

- Seminario-Cunya, J.F., Villanueva-Guevara, R., Valdez-Yopla, M.H. (2018). Rendimiento de cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) amarillos precoces del grupo Phureja. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 639-653.  
<https://dx.doi.org/10.15517/ma.v29i3.32623>
- Soto-Vásquez, M.R., Trujillo, J., Baca, R. (2014). Capacidad antioxidante in vitro de cuatro variedades de tubérculos de *Solanum tuberosum* L. "papa" (cruda y cocida, con y sin cáscara) frente al 2, 2-difenil-1-picrilhidrazil. *Tzhoecoen*. 6,243-259.
- Spooner, D.M., Núñez, J., Trujillo, G., Herrera, M.R., Guzmán, F., Ghislain, M. (2007). Extensive simple sequence repeat genotyping of potato landraces supports a major reevaluation of their gene pool structure and classification. *Proc Natl Acad Sci USA*, 104(49), 19398-19403. [doi: 10.1073/pnas.0709796104](https://doi.org/10.1073/pnas.0709796104).
- Spooner, D., Hettterscheid, W. (2006). 13. Origins, Evolution, and Group Classification of Cultivated Potatoes. En T. Motley, N. Zerega y H. Cross (Eds.), *Darwin's Harvest* (pp. 285-307). Columbia University Press. <https://doi.org/10.7312/motl13316-014>
- Spooner, D.M., Salas, A. (2006). Structure, biosystematics, and genetic resources. pp. 1-39. En: Gopal, J. y S.M. Paul Khurana (eds.). *Handbook of potato production, improvement, and postharvest management*. Haworth's Press, Binghamton, NY.
- Spooner, D.M., McLean, K., Ramsay, G., Waugh, R., Bryan, G.J. (2005). A single domestication for potato based on multilocus amplified fragment length polymorphism genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(41), 14694–14699. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507400102>
- Storey, M. (2007). The harvested crop. En: D. Vreugdenhil (Ed.), *Potato Biology and Biotechnology*, pp. 441 - 470, Elsevier, Amsterdam
- Stushnoff, C., Holm, D., Thompson, M.D., Jiang, W., Thompson, H.J., Joyce, N.I., Wilson, P. (2008). Antioxidant properties of cultivars and selections from the Colorado Potato Breeding Program. *Am. J. Pot Res*, 85: 267-276
- Szajdek, A., Borowska, E. (2008). Bioactive Compounds and Health-Promoting Properties of Berry Fruits: A Review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 63,147- 156
- Tatarowska, B., Milczarek, D., Plich, J. (2023). The content of total carotenoids, vitamin c and antioxidant properties of 65 potato cultivars characterised under the European Project ECOBREED. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14):11716.  
<https://doi.org/10.3390/ijms241411716>

- Tedone, L., Hancock, R.D., Alberino, S., Haupt, S., Viola, R. (2004). Long-distance transport of L-ascorbic acid in potato. *BMC plant biology*, 4, 16. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-4-16>
- Tirado, R., Tirado, R., Mendoza, J. (2018). Interacción genotipo x ambiente en rendimiento de papa (*Solanum tuberosum* L.) con pulpa pigmentada en Cutervo, Perú. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 34(3), 191-198. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902018005000502>
- United States - Department of Agriculture, Agricultural Research Service. [USDA]. (2020). *Food and Nutrient Database for Dietary Studies 2017-2018*. Food Surveys Research Group <http://www.ars.usda.gov/nea/bhnrc/fsrg>
- Valbuena, R.I., Roveda, G., Bolaños, A., Zapata, J.L., Medina, C.I., Almanza, P.J., Porras, P.D. (2009). *Escalas fenológicas de las variedades de papa parda pastusa, diacol capiro y criolla "yema de huevo" en las zonas productoras de Cundinamarca, Boyacá, Nariño Y Antioquia*. Corpoica, Cevipapa, Fedepapa, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Colombia. [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12893/44240\\_56518.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12893/44240_56518.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Van den Berg R.G., Jacobs, M.J. (2007). Capítulo 4: Molecular taxonomy. En D. Vreugdenhil (Ed.), *Potato biology and biotechnology advances and perspectives* (pp. 55-74). Elsevier.
- Vargas, A., Rivera, A., Narváez, C. (2005). Capacidad antioxidante durante la maduración de Arazá (*Eugenia Stipitata* Mc Vaugh). *Revista Colombiana de Química*, 34 (1), 57-65
- Vargas-Escobar, E.A., Vargas-Sánchez, J.E., Baena-García, D. (2016). Análisis de estabilidad y adaptabilidad de híbridos de maíz de alta calidad proteica en diferentes zonas Agroecológicas de Colombia. *Acta Agronómica*, 65(1),72-79. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169943143012>
- Vásquez, V., Cabrera, H.A., Jiménez, L.A., Colunche, A. (2019). Estabilidad del rendimiento de genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Ecología Aplicada*, 18(1), 59-65. <https://dx.doi.org/10.21707/rea.v18i1.1307>
- Verdú, J. (2005). *Nutrición y alimentación humana, nutrientes y alimentos*. Vol. 1. Editorial OCEANO/Ergon. Barcelona, España.
- Viola, R., Vreugdenhil, D., Davies, H.V., Sommerville, L. (1998). Accumulation of L-ascorbic acid in tuberising stolon tips of potato (*Solanum tuberosum* L.), *Journal of Plant Physiology*, 152(1), 58-63. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(98\)80102-8](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(98)80102-8)

- Vogt, T. (2010). Phenylpropanoid Biosynthesis. *Molecular Plant*, 3(1), 2-20. doi: [10.1093/mp/ssp106](https://doi.org/10.1093/mp/ssp106). Epub 2009 Dec 24. PMID: 20035037.
- Wissar, R. (1994). *Parámetros de estabilidad fenotípica. Curso de manejo de Germoplasma de papa*. Centro Internacional de la Papa: Lima-Perú.
- Xu, X., Li, W., Lu, Z., Beta, T., Hydamaka, A.W. (2009). Phenolic content, composition, antioxidant activity, and their changes during domestic cooking of Potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(21),10231-10238
- Xu, Y. (2001). Perspectives on the 21st. century development of functional foods: bringing Chinese medicatet diet and functional foods. *International Journal of food Science and Technology*, 36, 229-242
- Zapata, J.L., Cerón, M.S, Porras, P. D., Herrera, C.A. (2022). Manejo integral del cultivo de papa diploide (*Solanum phureja* Juz. et Buk.). En M. S. Cerón, L. Prieto, A. M. Garnica y J. Gabriel Ortega (Eds.). (2022). *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia*. Editorial Grupo Compás. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/38030>
- Zaragoza, T., Tene, V., Malagón, O., Armijos, Ch., Burneo, I, Jaramillo, X. (2004). Bioactividad de aceites esenciales y extractos de plantas medicinales y aromáticas de la Región Sur del Ecuador. FUNDACYT – UTPL. Ecuad

## 2. Efecto del ambiente sobre capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C de muestras crudas y cocidas de papa diploide Grupo Phureja

### Resumen

Es importante estudiar la influencia del ambiente sobre la respuesta de la capacidad antioxidante (CAO), fenoles totales y vitamina C en papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja); por tanto, se evaluaron 28 genotipos del banco de germoplasma vegetal (AGROSAVIA) más dos testigos en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca. Se utilizaron métodos espectrofotométricos para fenoles totales, CAO por ABTS y por FRAP; y método cromatográfico para vitamina C en tubérculos crudos y cocidos de los genotipos. El análisis de correlación identificó el grado de asociación entre variables climáticas y características fisicoquímicas del suelo en la respuesta de las variables estudiadas. Para muestras cocidas en base seca se obtuvo, CAO por ABTS entre 6777,42 a 11253,72  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g}$ ; fenoles totales entre 229,7 a 450,02 mg EAG/100g y vitamina C entre 6,14 a 9,70 mg AA/100g con 39 a 56% de retención. Sobresalió la correlación significativa de CAO por ABTS (muestras cruda y cocida) con fenoles totales (muestra cocida) con  $r=0,838$  y  $r=0,855$  respectivamente. La vitamina C no tuvo correlación con las demás variables y se debe cuantificar en cada tipo de muestra. Para la respuesta de CAO, fenoles totales y vitamina C, las variables climáticas que más contribuyeron positivamente fueron grados días acumulados a 60 días antes de cosecha y a la culminación del ciclo de cultivo, temperatura media al ciclo del cultivo y temperatura mínima a 60 días antes de cosecha; y las características fisicoquímicas del suelo que más incidieron negativamente fueron aluminio intercambiable, fósforo disponible y acidez.

**Palabras clave:** interacción genotipo ambiente, clima, propiedades del suelo, compuestos bioactivos, estadísticas agrícolas

## Abstract

It is important to study the influence of the environment on response of antioxidant capacity (AOC), total phenolics, and vitamin C in diploid potato (*Solanum tuberosum* Group Phureja); therefore, 28 genotypes from plant germplasm bank (AGROSAVIA) plus two controls were evaluated in eight environments of departamento de Cundinamarca. Spectrophotometric methods were carried out for total phenols, AOC by ABTS and by FRAP, and chromatographic method for vitamin C in raw and cooked tubers of genotypes. The correlation analysis identified degree of association between climatic variables and physicochemical characteristics of soil in response of studied variables. For samples cooked on dry basis, AOC by ABTS was obtained between 6777.42 to 11253.72  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g}$ ; total phenols between 229.7 to 450.02 mg EAG/100g, and vitamin C between 6.14 to 9.70 mg AA/100g with 39 to 56% of retention. Significant correlation of AOC by ABTS (raw and cooked samples) with total phenols (cooked sample) stood out with  $r=0.838$  and  $r=0.855$  respectively. The vitamin C had no correlation with other variables and must be quantified in each type of sample. For the response of AOC, total phenols and vitamin C, the climatic variables that contributed most positively were accumulated degree days 60 days before of harvest and at end of crop cycle, average temperature at crop cycle and minimum temperature 60 days before of harvest; and the physicochemical characteristics of soil that had the most negative impact were exchangeable aluminum, available phosphorus, and acidity.

**Keywords:** genotype environment interaction, climate, soil properties, bioactive compounds, agricultural statistics

## 2.1 Introducción

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es un recurso importante por su diversidad genética y por su capacidad de adaptación a diversos ambientes (Hawkes, 1990). Es un alimento básico en varias regiones del mundo, principalmente en la región andina suramericana. La papa es fuente de nutrientes y de antioxidantes naturales contenidos en su piel y en su carne, destacándose como uno de los alimentos más completos para la seguridad alimentaria (Zhang et al., 2021; Navarre et al., 2016).

En Colombia, los genotipos del Grupo Phureja que presentan fenotipo de tubérculo

redondo amarillo, tanto en piel como en carne<sup>1</sup>, son conocidos con el nombre de ‘papa criolla’ y su producción va desde los 2500 hasta 3000 msnm o incluso más, en algunas zonas del país (Abaunza et al., 2022) y los departamentos líderes en este cultivo para el año 2022, fueron Cundinamarca, Boyacá y Nariño (Agronet, 2024).

La contribución del tubérculo en la alimentación de la población permite identificar estrategias que buscan mayor concentración y estabilidad de los compuestos fitoquímicos altamente deseables en la dieta, los que se afectan por varios factores como el genotipo, las características agronómicas, el manejo postcosecha, los procesos de cocción y las condiciones en que se realizan dichos procesos (Ezekiel et al., 2013). Cabe señalar que la plasticidad fenotípica del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) favorece su adaptación a condiciones adversas (Rodríguez et al., 2004); sin embargo, es poco lo que se conoce del efecto del ambiente sobre el genotipo y la interacción GxA, en los compuestos biológicamente activos que están relacionados con los fenoles y la capacidad antioxidante en papa diploide.

La estrategia de los especialistas en mejoramiento genético consiste en descomponer las interacciones que suceden en los ambientes objetivo a partir de un conjunto de variables observables y sintetizadas en componentes principales. Adicionalmente, para recomendar el consumo de los compuestos antioxidantes que se encuentran en la papa diploide, es importante desarrollar estudios enfocados en conocer el efecto del ambiente, como variables de clima y características fisicoquímicas del suelo, que contribuye a los cambios fisiológicos y bioquímicos de las plantas de papa para su normal desarrollo y crecimiento, más producción de tubérculos. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de variables de ambiente sobre la respuesta de la capacidad antioxidante, los fenoles totales y la vitamina C, en genotipos seleccionados de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja).

---

<sup>1</sup> Desde la botánica y la morfología de la papa (Inostroza et al., 2009), la piel del tubérculo se denomina peridermo e inmediatamente se encuentra debajo la corteza. La carne o pulpa del tubérculo se constituye del sistema vascular, el parénquima de reserva y la médula. En el presente trabajo se mantendrán los términos **piel** y **carne** para denominar las partes externa e interna del tubérculo, respectivamente; acorde con lo propuesto por Huamán (2008) para los descriptores morfológicos de papa.

## 2.2 Materiales y métodos

### 2.2.1 Método de selección de genotipos para el estudio

La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA antes Corpoica) realizó estudios previos en la Colección Central Colombiana de Papa, Grupo Phureja, perteneciente al banco de germoplasma vegetal. Dichos estudios emplearon la metodología de investigación participativa (trabajo conjunto con agricultores) junto con personal técnico para establecer parcelas de observación con 53 genotipos promisorios, de los cuales, se seleccionaron 28 genotipos (Figura 1) por criterios de interés morfológico (Tabla 2) y agronómico que se incluyeron en el presente estudio. Por consiguiente, los resultados de los estudios previos no se relacionan en este trabajo porque no hacen parte de los objetivos (Cerón et al., 2013).

### 2.2.2 Material vegetal

El material vegetal de este estudio comprende los 28 genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) seleccionados previamente, más dos variedades comerciales: Criolla Guaneña y Criolla Colombia como testigos (Figura 1 y Tabla 2).

### 2.2.3 Localización

Los tubérculos de los genotipos en estudio fueron sembrados en dos períodos consecutivos, de noviembre 2013 a marzo de 2014 y, de abril a agosto de 2014, en los municipios de: Une (4°21'02,65"N, 74°03'39,71"O y 3100 msnm); Mosquera (Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA a 4°41'37,69"N, 74°12'12,77"O y 2543 msnm); El Rosal (4°52'32,62"N, 74°15'17,61"O y 2689 msnm) y Zipaquirá (5°02'23,34"N, 74°01'55,09"O y 2950 msnm) del departamento de Cundinamarca. Las condiciones climáticas de las localidades se registraron durante el establecimiento y desarrollo del cultivo (Tabla 3), además, se determinaron las características fisicoquímicas de los suelos, a partir de análisis de suelos de las muestras de cada lote (Tabla 4).

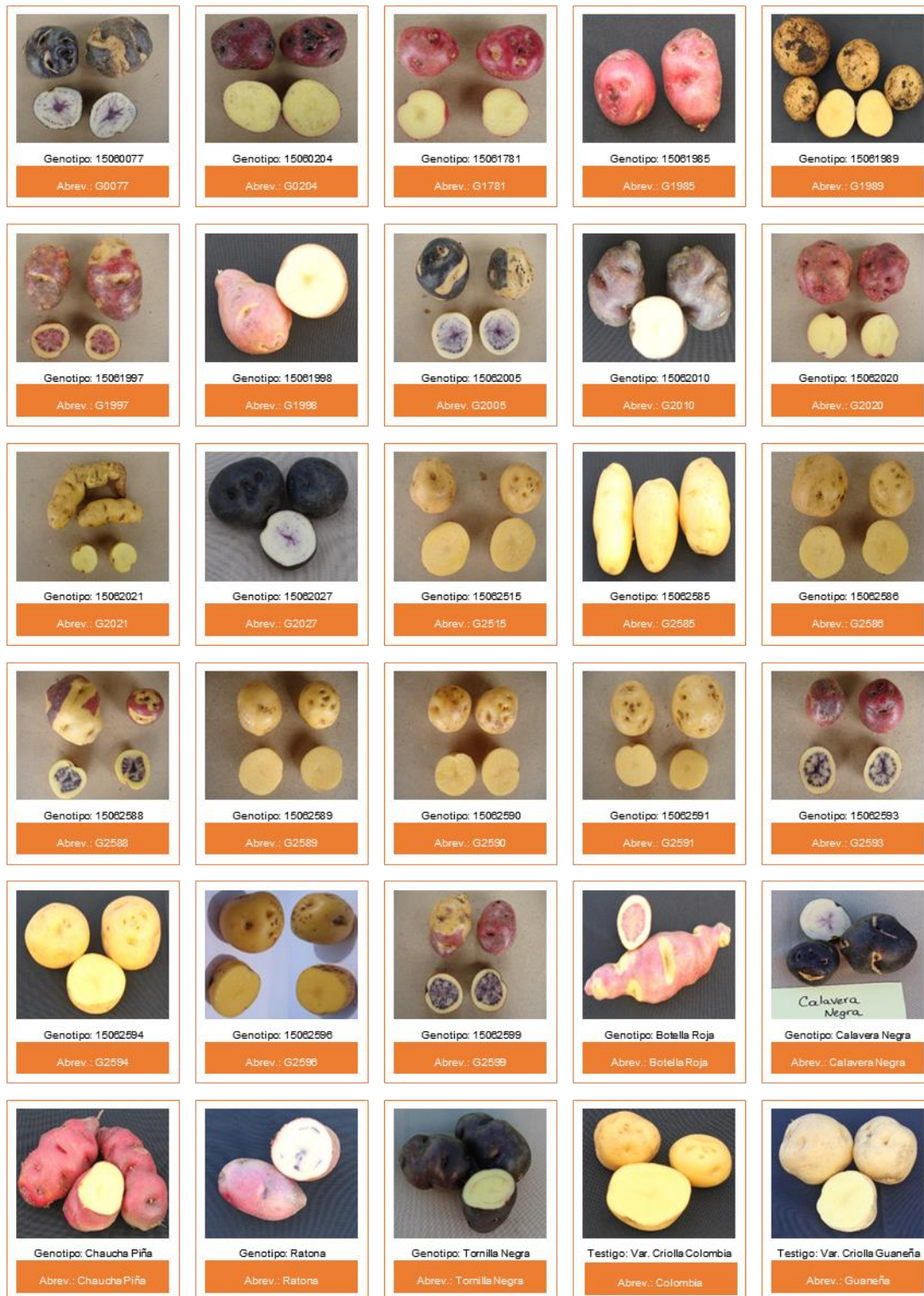
**Tabla 2.** Descripción morfológica de los genotipos de papa diploide evaluados según descriptores propuestos por Huamán (2008)

Nombre genotipo	No. registro accesión AGROSAVIA	Abreviatura genotipo	Tubérculo		
			Color piel*	Color carne	Forma
S.N.**	15062010	G2010	Rojo-morado	Amarillo claro	Concertinado
Chaucha Negra	15060077	G0077	Violeta/Crema	Blanco/Morado	Redondo
S.N.	15060204	G0204	Rojo-morado	Amarillo	Redondo
Chaucha Colorada	15061781	G1781	Rojo-morado	Crema	Redondo
Chaucha Ratona	15061989	G1989	Amarillo	Amarillo	Redondo
Naranjilla	15061997	G1997	Rojo/Crema	Amarillo/Rojo-morado	ovalado
Ratona Roja	15061998	G1998	Rojo	Amarillo	obovado
Chaucha Morada	15062005	G2005	Violeta/Crema	Amarillo/Morado	Redondo
Luki	15062020	G2020	Rojo	Amarillo	Redondo
3XX-1	15062021	G2021	Amarillo	Amarillo	Fulcado
Chaucha Mambera	15061985	G1985	Rojo	Amarillo	Oblongo
Clon 7010	15062515	G2515	Amarillo	Amarillo	Redondo
Pepina	15062585	G2585	Amarillo	Amarillo	Oblongo
Yema de Huevo No. 37	15062586	G2586	Amarillo	Amarillo	Redondo
S.N. No. 10	15062588	G2588	Rojo/Amarillo	Amarillo Violeta	Redondo
S.N. No. 7	15062589	G2589	Amarillo	Amarillo	Redondo
Criolla No. 11	15062590	G2590	Amarillo	Amarillo	Redondo
S.N. No. 5	15062591	G2591	Amarillo	Amarillo	Redondo
Bandera No. 6	15062593	G2593	Rojo-morado	Amarillo/Violeta	Redondo
Yema de Huevo No. 14	15062594	G2594	Amarillo	Amarillo	Redondo
Papa Criolla No, 12	15062596	G2596	Amarillo	Amarillo	Redondo
S.N. No. 5	15062599	G2599	Rojo-morado/Amarillo	Amarillo/Violeta	obovado
Botella Roja	Botella Roja	Botella Roja	Rojo/Amarillo	Crema/Rojo	Concertinado
Calavera Negra	Calavera Negra	Calavera Negra	Violeta/Amarillo	Blanco/Violeta	Redondo
Chaucha Piña	15061767	Chaucha Piña	Rojo	Amarillo	Concertinado
Ratona	Ratona	Ratona	Rojo	Blanco/Violeta	Elíptico
Tornilla Negra	1502601	Tornilla Negra	Violeta	Blanco/Violeta	Concertinado
S.N.	15062027	G2027	Violeta	Blanco/Violeta	Redondo
Criolla Guaneña	N.A.***	Criolla Guaneña	Amarillo	Amarillo	Redondo
Criolla Colombia	N.A.	Criolla Colombia	Amarillo	Amarillo	Redondo

Nota. \* Color Primario/Color Secundario

\*\*S.N.= Sin Nombre

\*\*\*N.A. = No Aplica, son variedades comerciales



**Figura 1.** Genotipos de papa diploide utilizados en la determinación de capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C

**Tabla 3.** Variables climáticas tomadas en estaciones meteorológicas donde se realizaron los ensayos de campo con los genotipos evaluados (años 2013-2014)

Municipio de siembra	Nombre estación	Nombre ambiente	Código estación	Altura (msnm)	60 días antes de cosecha					En el ciclo de cultivo					
					Precipitación (mm)	Temperatura media (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Grados días acumulado (°C)	Días a cosecha (días)	Precipitación (mm)	Temperatura media (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Grados días acumulado (°C)
Mosquera	Tibaitatá	Tiba_A	21205420	2545	360,6	13,26	8,63	19,86	492,30	119	435,3	13,2	7,6	20,34	885,25
Mosquera	Tibaitatá	Tiba_B	21205420	2545	217,1	13,54	7,99	20,31	450,4	115	278,8	13,42	7,79	19,88	834
El Rosal	San Cayetano	Rosal_A	21206030	2680	593,4	17,11	16,91	17,89	589,3	117	1089	17,32	16,94	18,15	1130
El Rosal	San Cayetano	Rosal_B	21206030	2680	397,4	13,65	8,52	18,97	431,75	117	637,8	13,67	8,61	18,66	816,12
Une	Llano Largo	Une_A	35025050	3180	295,4	10,73	7,45	14,51	282,8	124	370,1	10,57	7,19	14,79	519,3
Une	Llano Largo	Une_B	35025050	3180	455,71	10,58	7,50	13,83	271,8	129	988,8	10,14	7,20	13,06	415,95
Zipaquirá	Particular	Zipa_A	*	2950	235,60	13,03	6,93	22,0	537,85	124	368,2	13,22	6,71	22,7	1009,2
Zipaquirá	Particular	Zipa_B	*	2950	184,40	13,62	7,43	22,38	498,25	117	259,4	13,45	7,51	21,68	926,75

Nota: \* Toma de información en estación privada con Equipo Metos 3.3, serie 8B8.

Tabla 4. Características fisicoquímicas de los suelos donde se establecieron los ensayos

Municipio (Ambientes)	pH	Textura	dS/m		cmol(±)/kg (Intercambiable)						Al+H (cmol(±)/kg) Acidez	cmol(±)/kg			mg/kg (Disponible)					
			CE	MO	Ca	K	Mg	Na	Al	CICE		P	S	Cu	Fe	Mn	Zn	B		
<b>Mosquera</b>																				
Tibaitata_A	5,07	Arcillo- limosa	0,33	8,14	6,60	1,09	1,91	0,47	0,06	0,30	10,45	73,54	37,98	3,7	1332	11,9	50,9	0,54		
Tibaitata_B	5,11	Arcillo- limosa	0,36	8,90	6,72	1,11	1,99	0,53	0,09	0,41	10,52	78,45	39,07	3,81	1367	12,80	59,65	0,62		
<b>El Rosal</b>																				
Rosal_A	5,24	Limosa	1,06	6,73	6,40	0,46	1,73	0,81	0,07	0,35	9,75	77,47	45,58	9,60	1698	6,60	31,00	0,48		
Rosal_B	5,18	Limosa	1,03	6,42	6,49	0,31	1,90	0,87	0,05	0,42	9,83	70,52	43,24	9,56	1580	5,90	37,00	0,51		
<b>Une</b>																				
Une_A	5,61	Franco- limosa	0,33	15,97	4,79	0,57	1,43	0,04	0,00	0,00	6,83	69,43	13,46	2,30	370	4,30	13,60	0,52		
Une_B	5,54	Franco- limosa	0,31	15,89	4,63	0,62	1,46	0,05	0,01	0,01	6,84	69,32	14,00	2,45	395	5,87	18,40	0,61		
<b>Zipaquirá</b>																				
Zipaquirá_A	4,92	Franco- limosa	0,41	12,98	4,87	0,79	0,84	0,12	2,09	2,34	8,96	235,77	7,69	7,5	956	13,3	7,5	0,35		
Zipaquirá_B	5,13	Franco- limosa	0,43	18,03	4,92	0,75	0,83	0,13	2,11	2,42	8,99	234,01	7,32	7,11	1002	15,02	9,14	0,54		

Nota: CE= Conductividad eléctrica; MO= Materia orgánica; CICE= Capacidad de intercambio catiónico efectivo.

### 2.2.4 Diseño experimental, establecimiento y manejo del cultivo

En cada ambiente de evaluación se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, los tratamientos correspondieron a los 28 genotipos en evaluación y dos variedades comerciales como testigos (Tabla 2). La semilla utilizada fue de categoría básica procedente de aeroponía. La unidad experimental se constituyó de tres surcos de 5 m de largo (15 m<sup>2</sup>), la distancia entre surcos fue de 1 m, la distancia entre plantas fue de 0,30 m. Para la evaluación de rendimiento se tomó la unidad experimental total de 15 m<sup>2</sup> eliminando de cada surco las plantas bordes. El área real utilizada en cada uno de los ensayos de cada uno de los ocho ambientes fue de 1350 m<sup>2</sup> (0,135 ha), el área total utilizada por ambiente fue de 1500 m<sup>2</sup> (0,15 ha) y el área total real utilizada de los ocho ambientes fue de 10800 m<sup>2</sup> (1,08 ha).

En cada ambiente se registraron diariamente los datos de precipitación; temperaturas mínima, media y máxima de las estaciones meteorológicas cercanas y pertenecientes al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM y de una estación particular en el municipio de Zipaquirá (cuyas coordenadas fueron -74,01 O y 5,03 N a 2905 msnm) con un Equipo Metos 3.3 serie 8B8. Los valores promedio de las variables climáticas se exhiben en la Tabla 3.

Adicionalmente, se calcularon los grados días acumulados (GDD) con temperatura base de 7 °C para papa de acuerdo con el estudio de Flores-Magdaleno et al. (2014), mediante la siguiente ecuación:

$$GDD = \frac{\text{Temperatura máxima diaria del aire} + \text{Temperatura mínima diaria del aire}}{2} - \text{Temperatura base}$$

Según reportes de Santos (2010), la formación de tubérculos en las variedades testigos Criolla Colombia y Criolla Guaneña (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) inicia a los 21 días después de la emergencia, razón por la cual se consideraron las variables climáticas en dos fases del desarrollo del cultivo, para los diferentes análisis estadísticos, así: a los 60 días antes de cosecha, fase de llenado de tubérculos y a la culminación del ciclo de cultivo (Tabla 3).

Las prácticas agronómicas fueron similares en ambos períodos, se aplicó una dosis de 22 g/planta a la siembra del fertilizante de síntesis química 13-26-6, a razón de 94 kg N/ha, 189 kg P/ha y 44 kg K/ha para un total de 726 kg/ha. Según Saldaña-Villota y Cotes-Torres (2020) esta dosis básica es utilizada por los agricultores para el normal desarrollo y crecimiento de las plantas en sus órganos vegetativos y reproductivos. La dosis mencionada se aplicó a todos los ensayos para evitar un efecto diferencial en los genotipos evaluados y los ambientes, con el fin de no ingresar una interferencia en el estudio. En la Tabla 4 se presentan los promedios de las características fisicoquímicas de los suelos donde se establecieron los ensayos.

### 2.2.5 Preparación de la muestra

Los tubérculos de los genotipos evaluados fueron cosechados entre los 110 a 119 días de cultivo, acorde a los períodos vegetativos. Al azar se tomaron tres plantas ubicadas en el surco central de cada unidad experimental y, de cada planta, se cogieron dos tubérculos de 50 g, uno para cada tipo de muestra (cruda y cocida). Luego los tubérculos fueron llevados al Laboratorio de Semillas del banco de conservación de semilla sexual en el Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA y se continuó con la preparación de las muestras para los análisis. Los tubérculos se lavaron de manera exhaustiva con agua destilada.

Para el análisis de las muestras crudas, se cortaron los tubérculos de forma longitudinal, se congelaron con nitrógeno líquido y se llevaron a conservación a  $-70,8$  °C. Posteriormente, se liofilizaron hasta una humedad de 0,45 a 0,55%, se trituraron, se pasaron por tamiz ASTM E11-61 No. 40 (0,420 mm) con abertura estandarizada (ISO 3310-1:2016) y se almacenaron a  $-20$  °C hasta realizar la determinación de las variables de capacidad antioxidante (CAO) por ABTS y por FRAP, fenoles totales y vitamina C.

Para los análisis de las muestras cocidas, primero se llevó a ebullición el agua ( $90 \pm 0,5$  °C), se colocaron los tres tubérculos enteros y se cocieron durante 9 min según ensayos preexperimentales, para determinar el tiempo de inactivación de la enzima peroxidasa. Se registraron las temperaturas del agua y del interior del tubérculo. Se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se conservaron a  $-70,8$  °C, luego se liofilizaron hasta una humedad de 0,45 a 0,55%, se trituraron, se tamizaron y se almacenaron a  $-20$  °C hasta la cuantificación de las variables de estudio.

### 2.2.6 Determinación de los compuestos antioxidantes

Los análisis de CAO por ABTS y por FRAP, fenoles totales y vitamina C se realizaron en el Laboratorio de Ciencias de los Alimentos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. En la Tabla 5 se presentan los métodos de determinación de las variables en estudio, tanto en muestras crudas como en muestras cocidas, de los 28 genotipos evaluados más las dos variedades comerciales como testigo. Enseguida se describen los métodos referidos.

**Tabla 5.** Métodos de análisis para la determinación de capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C

Método	Unidades*	Referencia
ABTS (espectrofotométrico)	μmol de Trolox/100 g BS	Re et al. (1999)
FRAP (espectrofotométrico)	mg (AEAC)/100 g BS	Benzie y Strain (1996)
Fenoles totales (espectrofotométrico)	mg EAG/100 g BS	Singleton y Rossi (1965)
Vitamina C (cromatográfico)	mg AA/100 g BS	Shakya y Navarre (2006)

*Nota.* \* Las unidades se expresan en Base Seca (BS) de la muestra.

#### ▪ Método para CAO por ABTS

La capacidad para atrapar radicales libres, se realizó empleando el método del radical catiónico ABTS<sup>+</sup> [2,2'-Azino-bis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico) sal diamonio]. Una vez generado el radical con persulfato de amonio después de reposo de 16 h en oscuridad, fue adecuadamente disuelto en buffer de fosfatos a pH 7,4. Por separado se preparó una referencia y un blanco. En el caso de la referencia se utilizaron 10 μL de etanol como solvente de la muestra más 990 μL de ABTS, y para el blanco se cambió el ABTS por el solvente de la muestra. Aparte en tubos de ensayo se mezclaron 10 μL del extracto etanólico de la muestra obtenida con 1,3 g de muestra liofilizada en etanol y 990 μL de solución de ABTS. La absorbancia se determinó a 734 nm de longitud de onda luego de un tiempo de reacción de 30 min a temperatura ambiente y en oscuridad. El cálculo de la actividad antioxidante se realizó mediante la curva de calibración % inhibición = 0,0471(μmol) – 11,17 con R<sup>2</sup>=0,9942 para un rango de medición de 12,1 a 93,7% inhibición y con el Trolox<sup>®</sup> como antioxidante de referencia. Los resultados fueron reportados como TEAC (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity) en μmol de Trolox/100 g de muestra liofilizada en BS (Re et al., 1999).

### ▪ Método para CAO por FRAP

Con el método FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) propuesto por Benzie y Strain (1996), se establece el poder reductor mediante transferencia de electrones desde los antioxidantes hasta un átomo de  $\text{Fe}^{3+}$  provocando su reducción. Se preparó una solución de reacción formada por  $\text{FeCl}_3$ , tripiridil triazina y buffer de acetatos pH 3,4 en proporción de 1:1:10. Para los ensayos se tomaron 900  $\mu\text{L}$  de la solución anterior, 50  $\mu\text{L}$  de muestra etanólica y 50  $\mu\text{L}$  de solución de buffer acetato a pH 3,4. Transcurridos 30 min de reacción se determinó la absorbancia a una longitud de onda de 593 nm. La curva de calibración  $\text{Absorbancia} = 0,0209(\text{mg/L}) + 0,0616$  con  $R^2=0,9941$  en un rango de medición de 0,080 a 1,010 Absorbancia, se construyó con ácido ascórbico como estándar. El poder reductor de las papas se expresó como AEAC (ascorbic acid equivalent antioxidant capacity) en mg de ácido ascórbico/100 g de muestra liofilizada en BS.

Los métodos de ABTS y FRAP son complementarios y permiten caracterizar adecuadamente la capacidad antioxidante de una compleja matriz alimentaria como es la papa (Liu, 2010).

### ▪ Método para fenoles totales

Los compuestos fenólicos se cuantificaron mediante el poder reductor de la muestra de papa sobre el reactivo Folin-Ciocalteu, según el procedimiento de Singleton y Rossi (1965). En tubos de ensayo se adicionaron en estricto orden 50  $\mu\text{L}$  de muestra en etanol, 125  $\mu\text{L}$  de reactivo de Folin-Ciocalteu, 400  $\mu\text{L}$  de carbonato de sodio al 7,1% y 425  $\mu\text{L}$  de agua tipo I. Adicionalmente se preparó un blanco sustituyendo el reactivo de Folin-Ciocalteu por agua tipo I. La mezcla reaccionó durante 1 h y finalizado este período se registró la absorbancia a 760 nm de longitud de onda. Los fenoles totales se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (AG), ya que con este monofenol se construyó la curva de calibración  $\text{Absorbancia} = 0,0047(\text{mg/L}) + 0,1278$  con  $R^2=0,9939$  para un rango de medición de 0,150 a 1,150 Absorbancia y los resultados se expresaron en mg Eq AG/100 g de muestra liofilizada en BS.

Se resalta que la determinación de fenoles totales en tubérculos pigmentados permite visibilizar la importancia de su actividad antioxidante, debido a que estos compuestos se logran retener en diferentes tipos de procesos aplicados a la papa que hace parte de los

alimentos involucrados en la seguridad alimentaria (Barragán-Condori y Aro-Aro, 2017; Ji et al., 2012).

### ▪ **Método para vitamina C**

La vitamina C expresada como ácido ascórbico se cuantificó en los genotipos evaluados mediante cromatografía líquida por el método de Shakya y Navarre (2006). El cromatógrafo marca Shimadzu® de la línea Prominence® se empleó en los ensayos. La fase móvil fue una solución de ácido fórmico al 0,1% en agua purificada, mediante sistema de elución isocrático y flujo de 0,8 mL/min. La fase estacionaria fue una columna LiChrospher® 100 RP-18 (5 µm) marca Merck® con dimensiones de 250 mm de largo y 4 mm de diámetro interno, mantenida a una temperatura de 35 °C durante todo el análisis. Con ayuda de un automuestreador, se inyectaron 20 µL de muestra extraída en etanol, previamente filtrada con acrodiscos de celulosa de tamaño de poro de 0,45 µm. El contenido de vitamina C fue calculado mediante la curva de calibración  $\text{Área} = 28114(\text{mg/L}) + 1 \times 10^6$  con  $R^2=0,9962$  en un rango de medición de 5 a 400 mg/L, usando ácido ascórbico grado HPLC. El tiempo de retención del estándar fue de 3,9 min y su detección mediante el arreglo de diodos a 245 nm. La vitamina C se expresó como mg Eq AA/100 g de muestra liofilizada en BS.

La vitamina C se determinó para comprobar su porcentaje de retención luego de la cocción, porque esta sustancia es sensible al calor (termosensible), a la oxidación, a la lixiviación y a la pérdida de humedad (Suárez-Hernández et al., 2004).

### ▪ **Tratamientos adicionales de los resultados**

Para CAO por ABTS, CAO por FRAP, fenoles totales y vitamina C se estimaron las diferencias de los resultados obtenidos de las muestras cocidas con respecto a las muestras crudas, para establecer aumentos (tasa de aumento), pérdidas o retenciones (porcentaje de retención) de los compuestos cuantificados.

## **2.2.7 Análisis estadístico**

A partir de los datos obtenidos en la capacidad antioxidante (ABTS y FRAP), fenoles totales y vitamina C para muestras en crudo y en cocido, se estandarizaron a valores Z antes de realizar los análisis estadísticos que se explican a continuación, para eliminar los efectos de

las diferencias de magnitud entre variables, y aquellos asociados a la escala de las unidades de medida. Utilizando el procedimiento GLM del programa SAS versión 9 (SAS Institute, 2004) se realizaron los análisis de varianza combinado sobre los ambientes, en el cual el efecto fijo fueron los genotipos y el efecto aleatorio fueron los ambientes, con distribución normal e independiente en torno a una media cero y con varianza común. Del mismo modo, para el anidamiento de repeticiones dentro de ambientes se utilizó la prueba F. Se realizaron comparación de medias utilizando la prueba de rango de Tukey ( $P \leq 0,05$ ). El modelo de análisis propuesto por Zobel et al. (1988) y Crossa et al. (1990) fue utilizado mediante la siguiente ecuación:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + R_j(A_i) + G_k + A_iG_k + E_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = Valor observado de la j-ésima repetición anidada en el i-ésimo ambiente en el K-ésimo genotipo

$\mu$  = Efecto de la media general

$A_i$  = Efecto del i-ésimo ambiente ( $i=1$  a  $8$ )

$R_j(A_i)$  = Efecto de la j-ésima repetición anidada en el i-ésimo ambiente

$G_k$  = Efecto del k-ésimo genotipo ( $k= 30$ )

$A_iG_k$  = Efecto de la interacción del i-ésimo ambiente del k-ésimo genotipo

$E_{ijk}$  = Variación residual contribuida por el i-ésimo ambiente, la j-ésima repetición y el k-ésimo genotipo

La correlación de Pearson se realizó para identificar el grado de asociación entre CAO (por ABTS y por FRAP), fenoles totales y vitamina C, junto con la prueba de significancia estadística. También se realizó la correlación de Pearson entre las variables climáticas y las características fisicoquímicas de suelo. Luego el análisis por componentes principales (ACP) permitió transformar el conjunto de variables climáticas y las características fisicoquímicas de suelo (Tablas 3 y 4) en un nuevo grupo de variables no correlacionadas llamadas componentes principales (CP) (Polanco, 2016; Restrepo et al., 2012).

Enseguida se realizó para cada variable estudiada el análisis de covarianza, con los vectores propios de los CP relevantes del ACP (valores propios  $> 1,0$ ) como covariable (Olivera et al., 2010). Se identificaron los CP significativos, sin dejar de lado su  $R^2$ , al igual que sus estimadores con su respectivo signo, para luego identificar las variables

climáticas y las características fisicoquímicas de suelo de mayor contribución a la formación de cada uno de los CP, para cada una de las variables de estudio como CAO (por ABTS y por FRAP), fenoles totales y vitamina C.

Los resultados para los análisis estadísticos de la CAO, fenoles totales y vitamina C fueron derivados de los 30 genotipos establecidos en 8 ambientes bajo un diseño experimental con tres repeticiones de campo y tres réplicas en laboratorio (muestras crudas y cocidas) por cada unidad experimental de campo, como se observa en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Consolidado de muestras y de pruebas de laboratorio para los análisis estadísticos

	Ambientes	Repeticiones	Genotipos	Muestra de campo*	Réplicas de laboratorio	VARIABLES de análisis	Número de datos	Total de pruebas	Datos para análisis estadísticos
Muestras crudas	8	3	30	1	N/A	N/A	720	1440 muestras preparadas	N/A
Muestras cocidas	8	3	30	1	N/A	N/A	720		
Análisis antioxidantes muestras crudas	8	3	30	1	3	4	8640	17280 análisis de laboratorio en UNAL Sede Medellín	5760
Análisis antioxidantes muestras cocidas	8	3	30	1	3	4	8640		

*Nota.* \*1 muestra con 3 tubérculos. N/A: no aplica.

## 2.3 Resultados y discusión

### 2.3.1 Estadística descriptiva para capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C

En la Tabla 7 se presenta la estadística descriptiva de las variables en estudio cuantificadas. Los valores del coeficiente de variación fueron inferiores al 9%, y los valores de las desviaciones estándar evidenciaron baja dispersión de los resultados con respecto a la media.

Según los resultados obtenidos en BS (Tabla 7), la actividad antioxidante por el método ABTS presentó una media de  $7522,56 \pm 108,47 \mu\text{mol Trolox} / 100\text{g BS}$  de muestra cruda y de  $9199,46 \pm 135,13 \mu\text{mol Trolox} / 100\text{g BS}$  de muestra cocida; por el método FRAP la media fue de  $92,96 \pm 5,02 \text{AEAC}/100 \text{g BS}$  (cruda) y  $196,98 \pm 7,05 \text{AEAC}/100 \text{g BS}$  (cocida); y para fenoles totales la media fue de  $227,27 \pm 7,78 \text{mg EAG}/100 \text{g BS}$  (cruda) y  $325,31 \pm 9,36 \text{mg EAG}/100 \text{g BS}$  (cocida). Los resultados anteriores

mostraron incrementos en los valores de las variables mencionadas después de la cocción puesto que en el proceso de cocción se transforma la matriz alimentaria de la papa de modo físico y químico para obtener aspecto, textura, composición y valor nutritivo mediante la acción del calor, con el fin de convertirla más digerible, apetecible y sanitariamente segura para los consumidores (Crespo-Relucio, 2009).

La textura de la papa cocida está asociada con la materia seca que contiene principalmente almidón, azúcares, proteínas, minerales, entre otros. El almidón está en mayor porcentaje en el tubérculo, durante la cocción la textura cambia por las transformaciones producidas en los gránulos de almidón. Cuando el agua se calienta, la energía térmica se transfiere al interior del tubérculo y los gránulos de almidón comienzan a absorber agua y se hinchan, rompiendo las paredes celulares de la matriz alimentaria y continúa el aumento de temperatura hasta la gelatinización y retrogradación del almidón entre 62 a 68 °C (Garnica et al., 2022) desordenando la estructura organizada de la matriz en una estructura amorfa con almidón retrogradado que permite la dilución de los componentes de las células al interior del tubérculo (Crespo-Relucio, 2009; Yang et al. 2016); es decir, los cambios texturales durante la cocción de papa se relacionan con las transformaciones de las propiedades del almidón. Para este estudio, la cocción se realizó a  $90\pm 0,5$  °C como temperatura de ebullición y los tubérculos registraron a los 9 min de cocción una temperatura interna de 86 °C, lo cual confirmó que el almidón se gelatinizó y permitió una nueva textura con mayores componentes antioxidantes.

**Tabla 7.** Estadística descriptiva de 30 genotipos de papa diploide para la capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C

Variables	ABTS <sup>1</sup>		FRAP <sup>2</sup>		Fenoles Totales <sup>3</sup>		Vitamina C <sup>4</sup>	
	Cruda	Cocida	Cruda	Cocida	Cruda	Cocida	Cruda	Cocida
Media	7522,56	9199,46	92,96	196,98	227,27	325,31	15,30	7,40
Máximo	12559,84	14748,81	206,95	336,75	443,09	525,39	19,97	13,24
Mínimo	4219,02	5424,04	50,25	103,31	103,62	161,17	10,09	4,29
Desviación estándar	108,47	135,13	5,02	7,05	7,78	9,36	1,00	0,62
Coefficiente de variación (C.V.) (%)	1,46	1,47	5,76	3,78	3,58	2,97	6,63	8,46

Nota. <sup>1</sup>. ABTS ( $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ ); <sup>2</sup>. FRAP (AEAC /100 g BS); <sup>3</sup>. Fenoles totales: (mg EAG/100 g BS); <sup>4</sup> Vitamina C (mg de AA/100 g BS).

Se han realizado estudios de propiedades físicas y químicas de tubérculos en crudo y luego, sometidos a diversos métodos de cocción y, dependiendo del tipo de cultivar y de

sus características agronómicas, al someterlos en procesamientos térmicos se obtienen incrementos o disminuciones de compuestos antioxidantes con respecto a sus valores iniciales en muestras crudas llegando a la conclusión de que hay influencia del método de cocción del tubérculo, el tiempo y la temperatura. El estudio desarrollado por Moreno-Guerrero et al. (2015), se reportó que en papa nativa cocida se presenta mayor capacidad antioxidante que en estado fresco, debido a que en el proceso térmico se produce la liberación de compuestos antioxidantes de tipo enzimático y no enzimático.

Para la actividad antioxidante por FRAP, los resultados estuvieron cercanos a lo reportado por García (2011) de 75,14 a 198,14 mg/100g BS. Esto indica que el proceso térmico de la cocción aumentó significativamente la actividad antioxidante para cada uno de los genotipos y concuerda con Moreno-Guerrero et al. (2015), quienes evaluaron el efecto de la cocción en papas pigmentadas y encontraron un incremento significativo de actividad antioxidante para la mayoría de las muestras; similares resultados obtuvieron Burgos et al. (2009b, 2013) y Peña et al. (2015).

Para la vitamina C se obtuvo una media de  $15,30 \pm 1,00$  mg de AA/100 g BS de muestra cruda y de  $7,40 \pm 0,62$  mg de AA/100 g BS de muestra cocida, con una disminución de esta vitamina termolábil en el proceso de cocción. Barragán-Condori y Aro-Aro (2017) confirmaron que a pesar de la liberación de compuestos antioxidantes siempre hay pérdidas de estos en el proceso de cocción, de horneado, de fritura y de cocción en microondas, siendo el proceso de fritura el que causó mayor degradación de los compuestos. Según las condiciones en las que se realice el proceso de cocción, se tendrá mayor o menor facilidad para la difusión de las sustancias hidrosolubles como vitaminas, minerales y carbohidratos desde el interior del tubérculo hacia el medio; como sucedió en la experimentación del presente estudio con agua en ebullición (Fang et al., 2022; Moreno-Guerrero et al., 2015; Peña-Melo, 2015).

### **2.3.2 Análisis de varianza combinado**

En la Tabla 8 se observa el análisis de varianza combinado de las diferentes variables evaluadas. Se presentaron diferencias estadísticas altamente significativas ( $P \leq 0,001$ )

entre ambientes, genotipos y la interacción GxA, lo que demuestra que en los ambientes de evaluación se presentaron condiciones diferentes tanto en variables de clima como en características fisicoquímicas del suelo, las cuales influyeron en la respuesta de los genotipos (Tablas 3 y 4). En el ambiente Rosal\_A se presentó la mayor precipitación acumulada en el ciclo de cultivo (1089 mm) y, en temperatura media, varió entre los dos ambientes del municipio entre 13,65 y 17,32 °C (Tabla 3). La textura del suelo en esta localidad fue limosa y diferente a los demás municipios, lo cual incidió en la poca oxigenación del sistema radicular que afectó el normal desarrollo de los tubérculos.

**Tabla 8.** Cuadrados medios del análisis de varianza combinado en muestras crudas y cocidas

Fuente de variación	Cuadrados medios de muestra cruda					Cuadrados medios de muestra cocida				
	GL <sup>1</sup>	ABTS <sup>2</sup>	FRAP <sup>3</sup>	Fenoles totales <sup>4</sup>	Vitamina C <sup>5</sup>	GL <sup>1</sup>	ABTS <sup>2</sup>	FRAP <sup>3</sup>	Fenoles totales <sup>4</sup>	Vitamina C <sup>5</sup>
Ambiente (A)	7	10157386***	7744***	19166,64***	10,34***	7	6893337***	6409,46***	6679,82***	19,56***
Bloque (A)	16	18774 <sup>ns</sup>	16,05 <sup>ns</sup>	178,29*	2,37*	16	24729 <sup>ns</sup>	146,39 <sup>ns</sup>	137,75 <sup>ns</sup>	1,02*
Genotipo (G)	29	37231481***	8020,27***	43081,16***	11,05***	29	49486104***	34823,97***	78088,42***	6,94***
Interacción GxA	203	1362171***	848,16***	2791,94***	5,25***	203	1689962***	3383,66***	2713,47***	2,12***
Error	464	18859	39,97	92,65	1,33	464	27954	74,22	137,71	0,56
Total	719					719				
R <sup>2</sup>		0,99	0,96	0,98	0,71		0,9929	0,98	0,98	0,75
C.V. (%)		1,83	6,80	4,24	7,52		1,82	4,37	3,63	10,14
Promedio		7522,56	92,96	227,27	15,30		9199,46	196,98	325,31	7,39

Nota. <sup>1</sup> GL (Grados de Libertad). <sup>2</sup> ABTS (µmol Trolox/100g BS); <sup>3</sup> FRAP (AEAC /100 g BS); <sup>4</sup> Fenoles totales (mg eq ácido gálico (EAG)/100 g BS). <sup>5</sup> Vitamina C (mg de AA/100 g BS). ns no significativo. \* Diferencias significativas (P≤0,05). \*\* (P≤0,01). \*\*\* Diferencias altamente significativas (P≤0,0001). C.V. = Coeficiente de variación. R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación.

## ■ Ambientes

En la Tabla 9 se presentan los resultados por ambiente de las variables evaluadas CAO por ABTS y por FRAP, fenoles totales y vitamina C. Los ambientes A y B del municipio de El Rosal, obtuvieron mayores valores de CAO y fenoles totales para las muestras crudas y cocidas y, de vitamina C para las muestras crudas. En los ambientes A y B de Tibaitatá (municipio de Mosquera) las muestras cocidas alcanzaron el mayor valor promedio de vitamina C. En el ambiente Rosal\_A se presentó el mayor valor de CAO por ABTS para muestra cocida con 9614,3 ± 113,9 µmol Trolox/100 g BS, en tanto que, en Rosal\_B se obtuvieron los mayores valores de CAO por ABTS con 8083,75 ± 57,83 µmol Trolox/100 g (cruda); CAO por FRAP

con  $105,58 \pm 2,51$  AEAC /100 g (cruda) y  $208,76 \pm 5,0$  AEAC /100 g (cocida); fenoles totales con  $254,65 \pm 5,45$  mg EAG/100 g (cruda) y  $340,33 \pm 5,43$  mg EAG/100 g (cocida); y vitamina C con  $15,73 \pm 0,74$  mg AA/100 g (cruda); con diferencias altamente significativas ( $P < 0,01$ ) respecto a los demás ambientes evaluados.

Los valores altos de CAO obtenidos en el ambiente Rosal\_A, se debe a que la precipitación promedio acumulada estuvo por encima del requerido de 900 mm para este tipo de cultivo (Porras y Herrera, 2015) (Tabla 3), sin embargo, se presentaron abundantes lluvias en la etapa de formación y llenado del tubérculo, lo cual según Jiménez et al. (2012) es referido como estrés hídrico por inundación, mientras que López-Olivari y Zúñiga-Sánchez (2019) mencionan el término de saturación cuando la condición del suelo presenta anegación inmediatamente después de un riego o lluvia abundante, donde el espacio poroso del suelo se encuentra en un 100% lleno de agua. En este estudio, los demás ambientes no presentaron estrés hídrico por saturación, ya que la distribución de la precipitación fue adecuada durante el ciclo de los cultivos. En cuanto a las características físicas del suelo, la textura limosa del ambiente Rosal\_A (Tabla 4) favoreció el déficit de oxígeno en las plantas que indujo a activar los mecanismos de defensa como una respuesta del sistema antioxidante en las mismas. En los demás ambientes las texturas de suelo fueron favorables para el crecimiento de las plantas de los genotipos de papa diploide.

Para el caso de los dos ambientes de Tibaitatá se presentaron altas concentraciones de Zn y de Fe (Tabla 4) en el suelo, con textura arcillo limosa, que ocupó el segundo lugar en valores de CAO en los genotipos evaluados. Según García-Gómez et al. (2017), la alta concentración de Zn en el suelo induce el estrés oxidativo en las plantas y estimula los sistemas antioxidantes en el tejido.

Es muy probable que tanto el estrés por alta humedad en suelo como el alto nivel de Zn en suelo hayan inducido a las plantas y a sus órganos a la formación de compuestos antioxidantes, como la vitamina C, para enfrentar los estreses referidos, como lo argumenta Mystkowska et al. (2021).

**Tabla 9.** Medias de capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP, fenoles totales y vitamina C en muestras crudas y cocidas para los ocho ambientes de evaluación

Ambientes	ABTS <sup>1</sup>		FRAP <sup>2</sup>		Fenoles totales <sup>3</sup>		Vitamina C <sup>4</sup>	
	Cruda	Cocida	Cruda	Cocida	Cruda	Cocida	Cruda	Cocida
Rosal_B	8083,7a±57,8	9612,3a±104,6	105,6a±2,5	208,8a± 5,0	254,6a±5,4	340,3a±5,4	15,7a±0,7	7,4b± 0,9
Rosal_A	7956,7b± 84,3	9614,3a±113,9	105,2a±4,1	205,7a±6,5	244,5b±7,2	334,0b± 8,9	15,6ab±1,1	7,5b±0,7
Tibaitatá_B	7594,7± 116,6	9245,8b±161,2	99,4b±5,0	201,5b±7,1	221,9cd±8,1	326,4c±11,2	15,1bcd±1,1	7,9a±0,6
Tibaitatá_A	7489,2d±142,0	9139,4c±137,3	92,3c±6,2	196,7c±8,6	224,5c±8,6	322,1c±12,4	15,4abc±1,3	8,0a± 0,6
Zipaquirá_A	7312,0e±121,5	8973,8e±137,1	86,4d± 6,0	183,4e±8,2	220,7cd±9,2	314,3d±11,7	14,8d±1,1	7,5b±0,7
Zipaquirá_B	7308,4e±106,1	9058,6d±140,2	85,6d±5,6	188,2d±7,7	217,9d±8,8	324,9c±11,7	14,9cd±1,0	7,5b±0,7
Une_B	7264,5e±128,3	9067,7cd±136,7	81,7e± 5,5	195,4c±6,3	222,6c± 8,0	324,3c±7,3	15,5ab±0,8	6,6c± 0,5
Une_A	7171,2f±111,1	8883,7f± 150,0	87,6d± 5,3	196,7c±6,9	211,4e±6,8	316,1d±8,3	15,3abcd±0,8	6,7c± 0,6

Nota. <sup>1</sup> ABTS ( $\mu\text{mol Trolox}/100 \text{ g BS}$ ); <sup>2</sup> FRAP ( $\text{AEAC}/100 \text{ g BS}$ ); <sup>3</sup> Fenoles totales ( $\text{mg EAG}/100 \text{ g BS}$ ); <sup>4</sup> Vitamina C ( $\text{mg AA}/100 \text{ g BS}$ ). Valores con letras diferentes demuestran diferencias significativas, según prueba de Rango de Tukey ( $P<0,01$ ).

## ■ Genotipos

En la Tabla 10 se presentan los resultados promedios de las variables evaluadas para los diferentes genotipos. El mayor promedio a través de los ambientes para CAO por ABTS se obtuvo en el genotipo G2020 con  $9405,94 \pm 95,84 \mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  (muestra cruda) y en Chaucha Piña con  $11266,22 \pm 134,03 \mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  (muestra cocida). Los genotipos G2020 y Chaucha Piña se caracterizaron por presentar piel de color rojo y carne de color amarillo (Tabla 2 y Figura 1), lo que confirma que la presencia de pigmentaciones con colores oscuros en los tubérculos favorece el contenido de compuestos antioxidantes. En general, los genotipos de color rojo en su piel y color morado oscuro mostraron mayores valores de la CAO por ABTS tal como lo reportan Moreno-Guerrero et al. (2015). Los colores rojizos y púrpuras del tubérculo están relacionados con la presencia de antocianinas, principalmente glicósidos de pelargonina, malvidina y flavonoides (Loannou et al., 2012).

Adicionalmente, los genotipos G2020 y Chaucha Piña mostraron en el proceso de cocción una tasa de aumento significativo en su orden de 1,18 y 1,22 veces con respecto a los genotipos en crudo (Tabla 10). Estos resultados estuvieron cercanos a lo reportado por Navarre et al. (2010), para quienes la CAO aumentó en 1,28 veces en puré de papa de la variedad Purple Majesty después del cocido. La tasa de aumento para la CAO se obtuvo por los cambios físicos y químicos dados durante la

cocción al interior de los tubérculos, principalmente por los cambios de la gelatinización del almidón dando origen a la liberación de diferentes compuestos como los antioxidantes por las rupturas de las membranas celulares.

**Tabla 10.** Medias de capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP en base seca de muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Genotipo	ABTS <sup>1</sup>			FRAP <sup>2</sup>		
	Cruda	Cocida	Tasa de aumento	Cruda	Cocida	Tasa de aumento
Tornilla Negra	9299,17 ± 89,25 ab	10765,71 ± 66,78 c	1,16	100,46 ± 5,50 efgh	211,81 ± 9,48 e	2,11
Chaucha Piña	9220,19 ± 97,92 b	11266,22 ± 134,03 a	1,22	119,13 ± 4,11 b	237,30 ± 5,69 c	2,00
G1985	9155,12 ± 140,09 b	11164,36 ± 233,61 ab	1,22	94,54 ± 5,16 hij	222,18 ± 8,28 d	2,35
G0204	8967,42 ± 88,95 c	10663,62 ± 92,55 cd	1,19	106,53 ± 3,98 cde	210,72 ± 5,15 e	1,97
G2020	9405,94 ± 95,84 a	11067,49 ± 117,09 b	1,18	163,61 ± 6,1 a	280,30 ± 7,14 a	1,71
Calavera Negra	8697,44 ± 125,79 d	10143,46 ± 112,83 ef	1,17	87,21 ± 5,53 klmn	158,35 ± 7,69 k	1,81
G2010	8636,66 ± 174,39 d	10645,33 ± 180,31 cd	1,23	111,84 ± 5,41 c	234,64 ± 8,92 c	2,10
G2027	8601,92 ± 66,71 d	10215,93 ± 153,74 e	1,19	89,94 ± 2,22 jkl	179,15 ± 3,78 g	2,00
G1997	8437,55 ± 130,50 e	9962,43 ± 195,13 fg	1,18	94,77 ± 5,69 hij	262,70 ± 9,63 b	2,77
G2005	8308,28 ± 144,98 ef	10573,48 ± 216,24 d	1,27	104,12 ± 5,47 def	200,88 ± 8,75 f	1,93
G0077	8144,80 ± 159,93 g	10554,85 ± 195,71 d	1,30	96,92 ± 2,87 ghi	224,90 ± 7,91 d	2,32
G2593	8194,36 ± 125,17 fg	10192,89 ± 170,66 e	1,24	99,72 ± 6,29 efgh	272,62 ± 3,73 a	2,73
Ratona	8155,78 ± 125,60 g	10627,36 ± 228,21 cd	1,30	108,84 ± 7,21 cd	199,82 ± 6,85 f	1,83
G2599	8085,64 ± 86,69 gh	9579,20 ± 129,13 h	1,18	99,48 ± 6,07 fgh	255,68 ± 8,62 b	2,57
G1781	7962,44 ± 133,82 h	9930,97 ± 160,31 g	1,25	90,02 ± 4,49 jkl	193,53 ± 5,90 f	2,15
Botella Roja	7742,05 ± 109,44 i	9497,91 ± 117,13 h	1,23	81,80 ± 4,03 mnop	175,45 ± 10,50 gh	2,14
G2596	7069,31 ± 125,87 j	8261,61 ± 70,83 k	1,17	80,34 ± 5,36 opq	167,50 ± 7,14 hijk	2,08
G2588	7064,67 ± 93,97 j	8719,65 ± 128,62 i	1,23	91,19 ± 5,80 ijk	198,45 ± 8,77 f	2,18
G2021	6910,87 ± 62,07 k	8524,06 ± 67,07 j	1,23	102,72 ± 5,10 defg	215,97 ± 7,63 de	2,10
G2591	6854,79 ± 108,18 k	8108,33 ± 154,01 kl	1,18	74,35 ± 5,40 qrs	163,37 ± 6,33 ijk	2,20
G2589	6816,28 ± 111,63 k	7773,63 ± 165,37 n	1,14	72,73 ± 8,31 rs	168,02 ± 8,20 hij	2,31
G2515	6172,07 ± 61,26 mn	7828,33 ± 66,46 n	1,27	78,71 ± 2,95 opqr	140,37 ± 4,91 l	1,78
G2586	6122,11 ± 47,15 n	7359,81 ± 60,32 p	1,20	75,93 ± 3,40 pqrs	166,17 ± 5,45 hijk	2,19
G2590	6400,44 ± 113,78 l	7532,12 ± 77,08 op	1,18	82,75 ± 6,87 mnop	168,63 ± 6,90 hij	2,04
G2585	6296,36 ± 119,91 lm	7552,13 ± 77,90 o	1,20	88,58 ± 4,16 jklm	172,28 ± 3,35 ghi	1,94
G2594	5955,4 ± 53,82 o	7848,48 ± 138,62 n	1,32	77,14 ± 4,03 pqrs	181,47 ± 6,68 g	2,35
G1989	6207,43 ± 44,88 mn	8031,06 ± 51,83 lm	1,29	84,03 ± 3,44 lmno	169,73 ± 4,22 hij	2,02
Criolla Guaneña	5702,03 ± 135,93 p	6940,01 ± 142,05 q	1,22	78,44 ± 7,39 opqrs	161,45 ± 10,77 jk	2,06
Criolla Colombia	5609,04 ± 153,57 pq	7876,00 ± 135,46mn	1,40	81,13 ± 5,78 nopq	143,55 ± 6,84 l	1,77
G1998	5481,20 ± 126,86 q	6777,42 ± 214,73 q	1,24	71,83 ± 2,53 s	172,36 ± 6,34 ghi	2,40

Nota. <sup>1</sup> ABTS (μmol Trolox/100 g BS); <sup>2</sup> FRAP (AEAC /100 g BS); Valores con letras diferentes demuestran diferencias significativas, según prueba de Rango de Tukey (P<0,05)

El proceso térmico aumentó significativamente la actividad antioxidante para los genotipos G2020 y Chaucha Piña, con valores superiores a los demás genotipos en estudio y con diferencias significativas (P>0,05), lo que concuerda con Molina et al. (2015), quienes evaluaron la CAO en tres clones de papa diploide nativa (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja), en proceso de precocción y congelación, y evidenciaron

que la precocción favoreció la retención y el aumento de los compuestos antioxidantes en los genotipos evaluados.

En la Tabla 10 se observa que el genotipo G2020 obtuvo el mayor valor para la variable CAO por FRAP en muestras cruda y cocida con  $163,61 \pm 6,1$  y  $280,30 \pm 7,14$  AEAC /100 g BS, respectivamente, con una tasa de aumento de 1,71 veces. Adicionalmente, Chaucha Piña también se destacó por su CAO por FRAP con  $119,13 \pm 4,11$  AEAC /100 g BS (cruda) y el genotipo G2593 obtuvo  $272,62 \pm 3,73$  AEAC /100 g BS (cocida). Este último genotipo se caracterizó por su color de piel rojo-morado y color de carne amarillo/violeta con forma redonda (Tabla 2 y Figura 1).

Los valores obtenidos fueron cercanos a los reportados por García (2011) para 22 clones de *Solanum phureja*. Adicionalmente, realizó un ensayo *in vivo* en pollos con una dieta de papa como aditivo nutracéutico y encontró que se aumentó el 25% de la CAO por FRAP en plasma de pollos debido a la presencia de compuestos fenólicos, razón por la cual, la papa diploide se puede usar como fuente de antioxidantes naturales.

Estudios de Külen et al. (2013), en doce clones de papa, reportan mayor CAO en tubérculos pigmentados con respecto a los de color amarillo y blanco. Lo mismo ocurrió en este estudio obteniendo resultados bajos de CAO por ABTS y por FRAP para las variedades testigo, debido a que estos genotipos poseen piel y carne de color amarillo (Tabla 10 y Figura 1). Del mismo modo, Ezekiel et al. (2013), Peña et al. (2015) y Yang et al. (2016), demostraron que el color del tubérculo es una variable importante en la CAO y está afectada con diversos factores como, por ejemplo, el tipo de cultivar. Esto también está reportado por López-Rodríguez y Ñustez-López (2020) en cultivares del Grupo Phureja.

La respuesta para fenoles totales se observa en la Tabla 11. Dos genotipos sobresalieron para muestra cruda, G2020 y Chaucha Piña con  $298,12 \pm 3,61$  y  $287,03 \pm 3,67$  EAG/100 g BS respectivamente y, para muestra cocida se destacaron G2020 y G0077 con  $402,41 \pm 7,53$  y  $400,76 \pm 3,01$  EAG/100 g BS, con una tasa de aumento luego del proceso de cocción entre 1,35 a 1,40 veces para los tres genotipos G2020, Chaucha Piña y G0077. Es importante señalar que el proceso de cocción puede producir hidrólisis de diferentes componentes liberando compuestos fenólicos, lo que

conduce a que el compuesto esté más disponible para la extracción (Burgos et al., 2013). Al respecto Giusti et al. (2014), estudiaron cuatro diferentes especies de *Solanum*, que constituyeron 20 genotipos nativos de diferentes colores y demostraron que el contenido fenólico depende más de la coloración de la muestra extraída que de la especie.

**Tabla 11.** Medias de fenoles totales en base seca de muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Genotipo	Fenoles totales <sup>1</sup>		
	Cruda	Cocida	Tasa de aumento
G2020	298,12 ± 3,61 a	402,41 ± 7,53 a	1,35
Chaucha Piña	287,03 ± 3,67 b	397,43 ± 7,74 a	1,38
G0077	286,81 ± 5,59 b	400,76 ± 3,01 a	1,40
G2593	280,62 ± 6,74 bc	369,95 ± 10,97 cde	1,32
G0204	275,60 ± 3,70 cd	389,64 ± 3,90 ab	1,41
Ratona	266,49 ± 12,51 de	381,35 ± 7,20 bc	1,43
G2027	266,29 ± 8,55 de	367,46 ± 8,75 def	1,38
G2599	263,62 ± 7,89 ef	381,79 ± 7,89 cde	1,45
G2010	263,30 ± 11,08 ef	354,72 ± 11,53 fg	1,35
G2021	257,25 ± 8,33 efg	358,17 ± 6,91 efg	1,39
G2588	254,78 ± 8,67 fgh	351,66 ± 7,35 gh	1,38
G1985	250,21 ± 15,81 gh	370,77 ± 11,65 cde	1,48
Calavera Negra	245,14 ± 3,31 hi	362,21 ± 17,88 defg	1,48
Tornilla Negra	244,80 ± 7,92 hi	371,40 ± 14,84 cd	1,52
G1781	239,46 ± 8,07 ij	353,11 ± 14,40 g	1,47
G1997	233,55 ± 13,15 j	356,83 ± 13,72 fg	1,53
G1989	206,68 ± 2,52 k	281,14 ± 2,06 j	1,36
G2005	203,50 ± 14,69 kl	340,09 ± 10,57 h	1,67
G2591	201,13 ± 10,62 kl	267,05 ± 9,30 k	1,33
G2585	195,22 ± 4,20 lm	283,48 ± 8,20 j	1,45
G1998	194,21 ± 8,07 lm	325,16 ± 11,27 i	1,67
Criolla Colombia	190,60 ± 5,79 mn	240,95 ± 5,99 n	1,26
G2590	185,23 ± 9,08 mno	252,46 ± 11,98 lmn	1,36
G2594	184,87 ± 7,12 mno	257,30 ± 7,01 klm	1,39
G2586	182,38 ± 9,39 no	248,57 ± 4,32 mn	1,36
G2515	182,18 ± 4,19 no	255,95 ± 6,52 klm	1,40
G2589	176,84 ± 6,36 op	254,75 ± 15,31 klm	1,44
Botella Roja	168,57 ± 6,30 pq	280,74 ± 8,38 j	1,67
Criolla Guaneña	167,55 ± 9,54 pq	239,70 ± 10,21 n	1,43
G2596	166,99 ± 6,56 q	262,33 ± 11,60 kl	1,57

*Nota.* <sup>1</sup> Fenoles totales (EAG/100 g BS). Valores con letras diferentes demuestran diferencias significativas, según prueba de Rango de Tukey (P<0,05).

El genotipo que obtuvo el mayor contenido de vitamina C en muestra cruda fue la variedad comercial Criolla Guaneña con 16,59 ± 1,41 mg AA/100 g BS y en muestra cocida G2010 con 8,63 ± 0,26 mg AA/100 g BS y un porcentaje de retención del 56% (Tabla 12). Este último genotipo presentó color rojo-morado en piel y amarillo claro en carne (Tabla 2 y Figura 1). Teniendo en cuenta que el consumo de papa se realiza

con tubérculos cocidos, es importante señalar que la cocción es un factor que disminuye en gran medida los contenidos de vitamina C. En este contexto, varios autores reportan diferentes intervalos de reducción de este compuesto que pueden estar desde el 20% hasta 90,42% (Bonierbale et al., 2010; Burgos et al., 2009a; Burgos et al., 2009b; Navarre et al., 2016; Tian et al., 2016). Por tanto, los tubérculos de color rojo o violeta en la piel pueden ser buena fuente de antioxidantes, según los estudios realizados por Hamouz et al. (2013).

**Tabla 12.** Medias de vitamina C en base seca de muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Genotipo	Vitamina C <sup>1</sup>		
	Cruda	Cocida	Porcentaje de retención (%)
Criolla Guaneña	16,59 ± 1,41 a	7,64 ± 0,63 bcdefg	46
G2020	15,50 ± 1,12 a	7,57 ± 0,30 bcdefghi	49
G2021	16,25 ± 0,69 ab	7,49 ± 0,43 cdefghi	46
Criolla Colombia	16,21 ± 0,69 abc	7,09 ± 0,49 efghi	44
G2594	15,96 ± 1,63 abcd	7,72 ± 0,66 bcdefg	48
G2591	15,85 ± 0,98 abcde	7,19 ± 0,56 defghi	45
G0077	15,76 ± 0,63 abcde	7,05 ± 0,63 efghi	45
Ratona	15,76 ± 1,17 abcde	6,96 ± 0,84 ghi	44
G1985	15,74 ± 1,09 abcdef	7,79 ± 0,41 bcdef	49
Botella Roja	15,73 ± 0,71 abcdef	7,13 ± 0,51 defghi	45
G2005	15,65 ± 0,99 abcdef	7,61 ± 0,73 bcdefgh	49
G2588	15,59 ± 1,55 abcdefg	7,91 ± 0,88 abcd	51
G0204	15,51 ± 1,47 abcdefg	7,78 ± 0,55 bcdef	50
G2010	15,46 ± 0,58 abcdefg	8,63 ± 0,26 a	56
Chaucha Piña	15,35 ± 0,86 abcdefgh	7,01 ± 1,17 efghi	46
G1998	15,21 ± 0,83 bcdefgh	8,38 ± 0,46 ab	55
G2027	15,18 ± 1,02 bcdefgh	7,68 ± 0,52 bcdefg	51
G2599	15,06 ± 1,25 bcdefghi	6,78 ± 0,53 i	45
Calavera Negra	14,98 ± 0,74 cdefghi	6,76 ± 0,50 i	45
G2515	14,97 ± 1,01 cdefghi	5,91 ± 0,48 j	39
G2589	14,90 ± 1,38 defghi	6,81 ± 0,89 hi	46
G1989	14,90 ± 0,87 defghi	7,75 ± 0,57 bcdefg	52
G2593	14,88 ± 1,39 defghi	7,30 ± 0,66 cdefghi	49
Tornilla Negra	14,76 ± 1,23 defghi	7,40 ± 0,61 cdefghi	50
G1781	14,75 ± 0,56 defghi	7,47 ± 0,50 cdefghi	51
G2586	14,65 ± 1,13 efghi	7,79 ± 0,84 bcde	53
G2585	14,50 ± 0,91 fghi	8,02 ± 0,52 abc	55
G1997	14,33 ± 0,83 ghi	7,15 ± 0,75 defghi	50
G2590	14,14 ± 0,87 hi	7,13 ± 0,93 defghi	50
G2596	13,89 ± 1,23 i	6,98 ± 0,76 fghi	50

Nota. <sup>1</sup> Vitamina C (mg AA/100 g BS). Valores con letras diferentes demuestran diferencias significativas, según prueba de Rango de Tukey (P<0,05).

Al respecto, López-Rodríguez y Nústiz-López (2020) realizaron estudios enfocados a determinar la CAO, fenoles totales, antocianinas totales, ácidos fenólicos y carotenoides de tubérculos cocidos de cuatro cultivares de papa del Grupo Phureja. El cultivar Violeta

(piel violeta y carne con pigmentación violeta) presentó los mayores contenidos de fenoles totales y la mayor CAO.

### **2.3.3 Análisis de correlación entre capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C**

En cuanto a la capacidad antioxidante (CAO) se encontró correlación significativa entre CAO por ABTS en muestra cruda con CAO por ABTS en muestra cocida ( $r=0,966$ ), también con fenoles totales en muestra cruda ( $r= 0,767$ ) y muestra cocida ( $r= 0,856$ ) y, con la CAO por FRAP en muestra cruda ( $r=0,708$ ). La CAO por FRAP en muestra cruda presentó correlación significativa con CAO por FRAP en muestra cocida ( $r=0,762$ ), también con fenoles totales en muestra cruda ( $r= 0,758$ ) y muestra cocida ( $r= 0,723$ ). Además, se encontró correlación significativa entre fenoles totales en muestra cruda con fenoles totales en muestra cocida ( $r=0,937$ ), con CAO por ABTS en muestra cocida ( $r=0,800$ ) y CAO por FRAP en muestra cocida ( $r=0,770$ ). LA CAO por FRAP en muestra cocida también presentó correlación significativa con fenoles totales en muestra cocida ( $r=0,772$ ) (Tabla 13). Molina et al. (2015) reportaron correlación significativa de la CAO por DPPH con fenoles totales ( $r=0,939$ ) y CAO por DPPH con CAO por FRAP ( $r=0,983$ ) en peso fresco; fenoles totales con CAO por FRAP ( $r=0,942$ ) y CAO por DPPH con CAO por FRAP ( $r=0,908$ ) en muestras precocidas de genotipos del Grupo Phureja. Concordante con Tian et al. (2016), quienes obtuvieron correlación significativa entre la CAO por DPPH con fenoles totales ( $r=0,72$ ).

La vitamina C no presentó correlaciones significativas con las otras tres variables en ambos tipos de muestras (Tabla 13), resultado que se explica debido a que la vitamina C es un compuesto termolábil e inestable, que es afectada por la temperatura y el tiempo de cocción. Este resultado destaca que la vitamina C es una variable que en muestras crudas y cocidas siempre se debe cuantificar, mientras que en las tres variables restantes evaluadas y dada su alta correlación, se puede escoger la de menor complejidad para su determinación y resulta igualmente informativa. En estudio realizado por Samaniego et al. (2020), evaluaron vitamina C, polifenoles totales, carotenoides y antocianinas en 11 genotipos de diferente nivel de ploidía (*Solanum sp.*) y reportaron correlación significativa entre polifenoles totales con CAO por ABTS ( $r=0,64$ ) pero no

hubo correlación entre vitamina C con polifenoles totales ( $r=0,23$ ) y vitamina C con CAO por ABTS ( $r=0,31$ ). Igualmente, registró Tian et al. (2016) que en su estudio no hubo correlación entre fenoles totales con vitamina C ( $r=0,34$ ) ni de CAO por DPPH con vitamina C ( $r=0,04$ ).

**Tabla 13.** Correlación de Pearson de capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C para muestras crudas y cocidas de los genotipos de papa diploide

Variables	Muestras crudas				Muestras cocidas			
	Capacidad antioxidante por ABTS	Fenoles totales	Capacidad antioxidante por FRAP	Vitamina C	Capacidad antioxidante por ABTS	Fenoles totales	Capacidad antioxidante por FRAP	Vitamina C
Capacidad antioxidante por ABTS	1							
Muestras crudas	Fenoles totales	0,7674	1					
	Capacidad antioxidante por FRAP	<.0001***		1				
	Vitamina C	0,0225	0,2171	0,3213	1			
		0,9058nc	0,2474nc	0,834nc				
Muestras cocidas	Capacidad antioxidante por ABTS	0,9659	0,8000	0,7222	0,1347	1		
	Fenoles totales	<.0001***	<.0001***	<.0001***	0,4778nc			
	Capacidad antioxidante por FRAP	0,8382	0,9368	0,7227	0,1436	0,8556	1	
	Vitamina C	<.0001***	<.0001***	<.0001***	0,4489nc	<.0001***		
		0,6927	0,7704	0,7616	0,1071	0,6905	0,7720	1
	<.0001***	<.0001***	<.0001***	0,5732nc	<.0001***	<.0001***		
	-0,0305	0,1011	0,1136	0,1711	-0,0234	0,1145	0,1476	1
	0,8728nc	0,5949nc	0,5500nc	0,3660nc	0,9023nc	0,5467nc	0,4364nc	

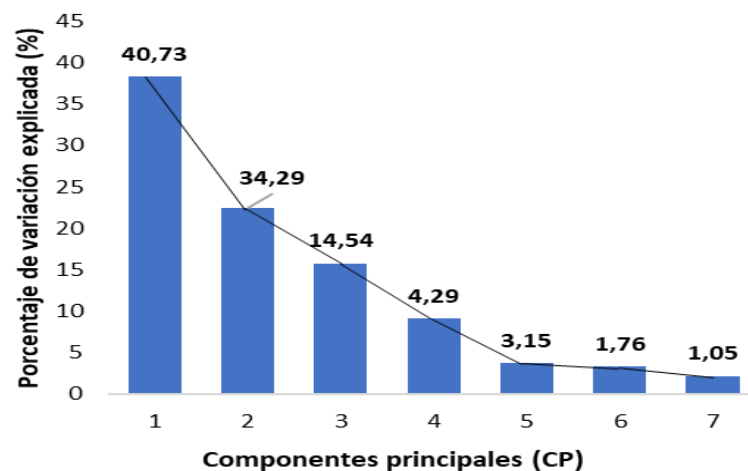
Nota. \*\*\*Probabilidad con alta correlación ( $P<0,01$ ); nc: no tiene correlación

Las variables de clima como las temperaturas de las que se derivan los grados días acumulados son importantes para medir la edad fisiológica de los cultivos y están estrechamente relacionadas con cada fase de desarrollo en las plantas, y permiten medir en unidades el calor que la planta recibe cada día y que se acumula a lo largo del desarrollo del cultivo. Esta información es fundamental en el desarrollo y crecimiento de las plantas de papa (Flores-Magdaleno et al., 2014; Flores-Gallardo et al., 2012). En este mismo sentido, Covarrubias-Ramírez et al. (2019) mencionan que los grados días acumulados es un factor determinante en la interacción suelo-clima-planta y que está relacionada con las etapas de desarrollo de los cultivos de papa.

Entre las características fisicoquímicas del suelo que se correlacionaron con las variables climáticas estuvo el pH, variable que afecta directamente la absorción de los nutrientes del suelo, así como la resolución de muchos procesos químicos que en él se producen. En cuanto al Na intercambiable, este incide en los procesos biológicos del suelo, alterando procesos de descomposición y disponibilidad de nutrientes e inhibiendo la dinámica propia del suelo (Castilla, 2006). Guerrero- Riascos (1998) confirma que los suelos donde se cultiva la papa son de diversas características fisicoquímicas, destacándose aquellos con alto contenido de materia orgánica, con valores de pH menores de 5,5, con bajo contenido de P disponible y alta capacidad de fijación de fosfatos.

### 2.3.4 Análisis de componentes principales de variables de ambiente

En la Figura 2 se observa la distribución de los siete componentes principales (CP) con sus respectivos porcentajes de aporte en la variación observada. El CP1 explicó el 40,73% de la variabilidad, el CP2 el 34,29%, CP3 el 14,54%, CP4 el 4,29%, el CP5 3,15%, CP6 1,76% y el CP7 1,05%.



**Figura 2.** Componentes principales de variables de ambiente en la evaluación de 30 genotipos del Grupo Phureja establecidos en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

En la Tabla 14 se presentan los cuatro primeros CP que presentaron valores propios  $\geq 1$  y que explicaron el 93,85% de la variación total acumulada. Estos CP se utilizaron como

covariables en el análisis de covarianza para CAO por ABTS, CAO por FRAP, fenoles totales y vitamina C.

**Tabla 14.** Valores propios, variabilidad individual y acumulada de los componentes principales

Componentes principales	Valor propio ( $\lambda \geq 1$ )	Variabilidad individual (%)	Variabilidad Acumulada (%)
CP1	11,81	40,73	40,73
CP2	9,94	34,29	75,02
CP3	4,22	14,54	89,56
CP4	1,24	4,29	93,85
CP5	<1	---	---

El análisis de componentes principales (ACP) permitió la disminución de variables correlacionadas (Anexo 1) en nuevos grupos de variables denominados CP. En la Tabla 15 se observan los cuatro CP con las contribuciones de las variables climáticas y de las características fisicoquímicas del suelo, llamadas en su conjunto variables de ambiente, de mayor peso en la varianza con valores  $\geq 5\%$  para los cuatro CP.

Las variables climáticas como grados días acumulado al ciclo de cultivo, temperatura media al ciclo de cultivo, temperatura mínima a 60 días antes de cosecha, precipitación a los 60 días antes de cosecha y altitud presentaron mayores pesos y contribuyeron a la formación del CP1 con un rango 5,12 a 7,51%. Las características fisicoquímicas del suelo como Al intercambiable, P disponible, acidez, Mg intercambiable, Ca intercambiable, Mn y S disponibles mostraron mayores pesos para la conformación del CP2 con un rango de 5,50 a 8,39%. En los CP3 y CP4 sobresalieron características fisicoquímicas del suelo como Zn disponible, K intercambiable, conductividad eléctrica, Cu disponible, B disponible y CICE cuyos rangos de mayores pesos en su orden fueron de 5,36 a 14,98% y 7,74 a 21,38% (Tabla 15). Sobresalieron Zn disponible en el CP3 (14,98%) y K intercambiable (21,38%).

**Tabla 15.** Contribución de variables climáticas y características fisicoquímicas del suelo en la conformación de componentes principales

Variables climáticas y características fisicoquímicas del suelo	CP1 Factor	Peso (%)
Grados días acumulado al ciclo del cultivo	-0,274	7,51
Temperatura media al ciclo del cultivo	-0,272	7,42
Fe disponible	-0,270	7,34
Temperatura mínima a 60 días antes de cosecha	-0,267	7,14
CICE	-0,251	6,32
Precipitación a 60 días antes de cosecha	-0,250	6,29
Cu disponible	-0,236	5,58
pH	0,233	5,45
Altitud	0,226	5,12
Temperatura máxima al ciclo del cultivo	-0,214	4,58
Na intercambiable	-0,211	4,48
Temperatura media a 60 días antes de cosecha	-0,208	4,37
Materia orgánica	0,196	3,86
Conductividad eléctrica	-0,182	3,31
S disponible	-0,165	2,72
Temperatura mínima al ciclo del cultivo	-0,162	2,64
Temperatura máxima a 60 días antes de cosecha	-0,156	2,46
Días a cosecha	0,151	2,29
Ca intercambiable	0,149	2,23
Mg intercambiable	0,126	1,59
Mn disponible	-0,121	1,48
K intercambiable	0,115	1,33
B disponible	0,113	1,29
Acidez	-0,101	1,04
Zn disponible	-0,100	1,01
P disponible	-0,069	0,48
Al intercambiable	-0,066	0,44
Grados días acumulados a 60 días antes de cosecha	-0,049	0,24
Precipitación al ciclo del cultivo	0,003	0,00

Variables climáticas y características fisicoquímicas del suelo	CP2 Factor	Peso (%)
Al intercambiable	-0,289	8,39
P disponible	-0,289	8,37
Acidez	-0,281	7,91
Mg intercambiable	0,270	7,34
Ca intercambiable	0,269	7,26
Grados días acumulados a 60 días antes de cosecha	0,254	6,49
Mn disponible	-0,247	6,11
S disponible	0,234	5,50
Precipitación al ciclo del cultivo	0,219	4,83
Temperatura media a 60 días antes de cosecha	-0,207	4,30
Temperatura máxima al ciclo del cultivo	-0,202	4,08
Na intercambiable	0,200	4,02
Temperatura máxima a 60 días antes de cosecha	0,189	3,59
MO	-0,187	3,51
Temperatura mínima al ciclo del cultivo	0,184	3,42
Conductividad eléctrica	0,176	3,10
Zn disponible	0,152	2,32
K intercambiable	-0,151	2,30
pH	0,149	2,23
B disponible	0,119	1,43
Fe disponible	0,093	0,87
Altitud	-0,080	0,64
Precipitación a 60 días antes de cosecha	-0,074	0,56
Temperatura mínima a 60 días antes de cosecha	0,070	0,50
Temperatura media al ciclo del cultivo	0,065	0,43
Grados días acumulado al ciclo del cultivo	-0,063	0,40
Días a cosecha	-0,025	0,06
CICE	0,011	0,01
Cu disponible	0,009	0,01

Variables climáticas y características fisicoquímicas del suelo	CP3 Factor	Peso (%)
Zn disponible	0,387	14,98
Altitud	-0,277	7,66
K intercambiable	0,274	7,53
B disponible	0,263	6,90
Precipitación al ciclo del cultivo	-0,251	6,32
CICE	0,241	5,81
Grados días acumulados a 60 días antes de cosecha	-0,238	5,67
Cu disponible	-0,232	5,36
Conductividad eléctrica	-0,207	4,30
Temperatura máxima a 60 días antes de cosecha	-0,205	4,22
Temperatura mínima al ciclo del cultivo	-0,205	4,20
Mn disponible	0,176	3,09
S disponible	0,174	3,01
Días a cosecha	-0,165	2,73
Al intercambiable	-0,156	2,43
P disponible	-0,155	2,39
Materia orgánica	-0,142	2,00
pH	-0,137	1,88
Mg intercambiable	0,133	1,77
Acidez	-0,132	1,73
Temperatura media a 60 días antes de cosecha	0,106	1,12
Precipitación a 60 días antes de cosecha	-0,100	0,99
Temperatura máxima al ciclo del cultivo	0,098	0,95
Fe disponible	0,091	0,82
Temperatura mínima a 60 días antes de cosecha	-0,090	0,81
Temperatura media al ciclo del cultivo	-0,070	0,49
Grados días acumulado al ciclo del cultivo	-0,068	0,46
Na intercambiable	0,045	0,20
Ca intercambiable	0,039	0,15

Variables climáticas y características fisicoquímicas del suelo	CP4 Factor	Peso (%)
K intercambiable	-0,462	21,38
Días a cosecha	-0,330	10,90
Temperatura máxima a 60 días antes de cosecha	-0,305	9,28
Conductividad eléctrica	0,289	8,34
Cu disponible	0,278	7,74
Temperatura mínima al ciclo del cultivo	-0,270	7,27
Precipitación a 60 días antes de cosecha	-0,261	6,81
Mn disponible	-0,209	4,35
Precipitación al ciclo del cultivo	-0,207	4,27
Na intercambiable	0,200	3,99
Grados días acumulados a 60 días antes de cosecha	-0,180	3,23
Grados días acumulado al ciclo del cultivo	-0,166	2,77
Temperatura mínima a 60 días antes de cosecha	-0,164	2,70
Temperatura media al ciclo del cultivo	-0,152	2,32
B disponible	-0,131	1,73
Materia orgánica	-0,083	0,68
Zn disponible	-0,082	0,68
Fe disponible	0,064	0,41
Temperatura media a 60 días antes de cosecha	0,057	0,32
Acidez	0,048	0,23
Temperatura máxima al ciclo del cultivo	0,042	0,17
Altitud	0,037	0,14
S disponible	0,031	0,09
Mg intercambiable	0,026	0,07
Ca intercambiable	0,021	0,05
Al intercambiable	0,019	0,04
pH	-0,015	0,02
CICE	-0,014	0,02
P disponible	0,005	0,00

Nota. El resaltado de cada componente principal corresponde a las variables de ambiente de mayor contribución.

VARIABLES CLIMÁTICAS COMO LA TEMPERATURA Y EL FOTOPERIODO TIENEN EFECTO DIRECTO SOBRE EL CRECIMIENTO Y EL DESARROLLO DE LOS CULTIVOS (MORAGUES Y McMASTER, 2012). EN EL CP1 LA TEMPERATURA MEDIA AL CICLO DE CULTIVO FUE SIMILAR PARA LOS DOS AMBIENTES DE TIBAITATÁ, ROSAL Y ZIPAQUIRÁ CON VALORES QUE OSCILARON ENTRE 13,2 HASTA 13,47 °C CON EXCEPCIÓN DE LOS AMBIENTES DE UNE CON TEMPERATURAS MEDIAS ENTRE 10,14 Y 10,57 °C (TABLA 3).

POR OTRA PARTE, EN EL CP1 LA ALTITUD Y LA TEMPERATURA REPERCUTIERON EN EL DESARROLLO DE LA PLANTA PORQUE A MAYOR ALTITUD MENOR TEMPERATURA Y, POR CONSIGUIENTE, AFECTÓ EL DESARROLLO Y FORMACIÓN DE LOS TUBÉRCULOS MÁS LOS CONTENIDOS DE LOS COMPUESTOS. MARTÍN-MARTÍN Y JEREZ-MOMPIE (2017) Y GABRIEL ET AL. (2013) SOSTIENEN QUE EL CULTIVO DE PAPA ES ALTAMENTE SENSIBLE A LA SEQUÍA Y SU EFECTO INCIDE EN LA PRODUCTIVIDAD Y DEPENDE DE LA ETAPA FENOLÓGICA EN QUE SE PRESENTE.

EN EL CP1 MOSTRÓ CONTRIBUCIÓN EL pH CON 5,45% (TABLA 15), CUYA VARIABLE EVALUARON BURGOS ET AL. (2021), E INDICARON QUE EL pH DEL SUELO AFECTA SIGNIFICATIVAMENTE LOS NIVELES DE LA CONCENTRACIÓN DE Fe EN LOS TUBÉRCULOS DE PAPA, DEBIDO A QUE LOS SUELOS ÁCIDOS FAVORECEN LA ACUMULACIÓN DE ESTE MINERAL EN LAS PLANTAS MIENTRAS QUE LOS SUELOS ALCALINOS LA DISMINUYEN.

PARA EL CP2, LOS ELEMENTOS CON MAYOR CONTRIBUCIÓN FUERON EL Al INTERCAMBIABLE (8,39%) Y EL P DISPONIBLE (8,37%) (TABLA 15). LOS ALTOS CONTENIDOS DE Al CONDUCEN EVENTUALMENTE A LA LIBERACIÓN DE IONES ( $Al^{3+}$ ), SIENDO LA PRINCIPAL CAUSA DE FITOTOXICIDAD Y LA ALTERACIÓN DEL CRECIMIENTO RADICULAR (CARREÑO Y CHAPARRO-GIRALDO, 2013). ESTOS PROCESOS DIFICULTAN LA ABSORCIÓN DE AGUA Y DE NUTRIENTES ESENCIALES COMO EL P, LLEVANDO A LA PLANTA AL ESTRÉS OXIDATIVO Y CON ELLO A LA MODIFICACIÓN DEL PERFIL DE EXPRESIÓN DE ANTIOXIDANTES, COMO LO MENCIONAN VERONICA ET AL. (2017). EL P DISPONIBLE CONTRIBUYE AL DESARROLLO TEMPRANO DEL CULTIVO Y A LA TUBERIZACIÓN, AUMENTA EL CONTENIDO DE MATERIA SECA DEL CULTIVO Y MEJORA LA CALIDAD DE ALMACENAMIENTO DEL TUBÉRCULO (RANA Y JHILTA, 2021). XING ET AL. (2020) ENCONTRARON QUE LA CALIDAD DEL TUBÉRCULO EN PAPA ES AFECTADA PRINCIPALMENTE POR LOS NUTRIENTES PRESENTES EN EL SUELO, EN ORDEN DESCENDENTE DE IMPORTANCIA, ASÍ: NITRÓGENO AMONIACAL DEL SUELO > FÓSFORO DISPONIBLE EN EL SUELO > NITRÓGENO NITRATO DEL SUELO > POTASIO DISPONIBLE > pH.

EL MICRONUTRIENTE Fe DISPONIBLE EN EL SUELO MÁS LOS MACRONUTRIENTES SECUNDARIOS COMO Ca Y S CONTRIBUYERON EN TODOS LOS COMPONENTES PRINCIPALES, LOS CUALES SON INDISPENSABLES PARA

el desarrollo, la formación y la calidad de los tubérculos en cuanto a textura, color, materia seca y contenido de compuestos químicos (Zapata et al., 2022; O'Hara, 2020).

Para el CP3 resaltó la contribución del Zn disponible (14,98 %), de la altitud y del K intercambiable (Tabla 15). El Zn es un micronutriente esencial en la nutrición de las plantas de papa que favorece el metabolismo de los hidratos de carbono y proteínas, la fotosíntesis, la formación de sacarosa y almidón, la floración, la producción de semillas, y es necesario, para la formación de auxina, la división celular y la elongación (Rana y Jhilita, 2021; Sarmah y Paul, 2022). El K es un nutriente móvil en la planta que favorece el metabolismo de ella y repercute en el rendimiento del tubérculo (Gao et al., 2021).

En el CP4, la variable de mayor peso fue el K intercambiable (21,38%), seguida con menor peso por días a cosecha (10,90%), y temperatura máxima a 60 días antes de cosecha (9,28%) como se muestra en la Tabla 15. Estas variables influyen en el desarrollo, la formación y el llenado del tubérculo (Rykaczewska, 2013; Vargas-Camacho et al., 2020). La temperatura en el cultivo de papa es fundamental considerarla debido a que es una planta termoperiódica que requiere una variación de temperatura en el día y en la noche (Moreno y Oropeza, 2017; Zúñiga Chila et al., 2017).

### **2.3.5 Variables de ambiente que afectan la respuesta de la capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C**

#### **▪ Capacidad antioxidante por ABTS**

En la Tabla 16 se relaciona el análisis de covarianza, en el cual se utilizaron los CP de mayor peso del ACP de las variables de ambiente, como covariables, su peso y su contribución para la respuesta de la variable de CAO por ABTS en muestras crudas y cocidas de los genotipos diploides evaluados. También, se muestran los estimadores obtenidos para la variable, los cuales permitieron conocer la contribución de cada una de las variables climáticas y características fisicoquímicas de suelos en las covariables.

En el caso de las muestras crudas los CP significativos con mayor peso en la respuesta de la variable CAO por ABTS fueron CP4, CP1 y CP2 con valores de  $R^2$  de 35,63%; 33,57% y 22,72% respectivamente (Tabla 16). En la covariable CP4, la característica fisicoquímica del suelo de mayor contribución fue K intercambiable, que al aumentar en

una unidad esta variable, la respuesta de la CAO por ABTS se incrementó en 98,77 unidades estándar (Tabla 16). Es importante resaltar que en papa el K interviene en la regulación del potencial osmótico de las células vegetales por lo que juega un papel importante en el desarrollo y llenado de los tubérculos (Nava et al., 2007; Taiz y Zeiger, 2006).

Al observar la covariable CP1 para muestras crudas, se encontró que la variable fisiológica grados días acumulados, temperatura media en el ciclo del cultivo y temperatura mínima a 60 días antes de cosecha, junto con la característica fisicoquímica del suelo Fe disponible, fueron las de mayor contribución. Estas variables presentaron efecto positivo en su contribución sobre la respuesta de la variable CAO por ABTS, es decir, por cada unidad de incremento de las variables mencionadas la respuesta de la CAO por ABTS en los genotipos evaluados se aumentó en promedio 18 unidades estándar (Tabla 16). Lo anterior indica que las variables climáticas fueron las de mayor peso sobre esta variable, ya que inciden en el crecimiento y desarrollo del cultivo, la formación del tubérculo con los compuestos químicos en su interior como los antioxidantes (Flores-Gallardo et al., 2012).

En la covariable CP2 para muestras crudas, las características fisicoquímicas del suelo de mayor contribución fueron: Al intercambiable, P disponible y acidez del suelo. El efecto de estas variables fue negativo sobre la respuesta de la CAO por ABTS, de tal manera que, al aumentar una unidad de estas variables, la respuesta de CAO por ABTS disminuye en promedio -17 unidades estándar (Tabla 16). Cuando en un suelo ácido se presenta toxicidad por Al, este puede desplazar al P disponible y afecta el normal crecimiento de las plantas, la tuberización y el desarrollo de los tubérculos; de igual manera, se afecta el contenido de los compuestos bioactivos en estos (Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño, 2018).

En muestras cocidas, las covariables CP4, CP1 y CP2 fueron las de mayor peso sobre la respuesta de la variable CAO por ABTS en términos del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) (58,07%; 16,64% y 14,25% respectivamente) (Tabla 16). En el caso de la covariable CP4, la característica fisicoquímica del suelo K intercambiable demostró la mayor contribución, siendo de efecto positivo, de tal manera que, por cada unidad de incremento, la respuesta de CAO por ABTS se elevó hasta 141,43 unidades estándar; corroborando que el proceso de cocción favoreció la mayor expresión de la variable

debido a las reacciones que suceden al interior de la matriz alimentaria del tubérculo. Esta respuesta indica que el K, como elemento mayor móvil y muy importante en la nutrición de la planta, favorece el metabolismo de ella y repercute en el rendimiento de los tubérculos (Gao et al., 2021). Para las covariables CP1 y CP2 presentaron menores valores de contribuciones en términos de R<sup>2</sup>, por lo que el análisis se fundamentó en la covariable de alta contribución CP4 en muestras cocidas (Tabla 16).

**Tabla 16.** Análisis de covarianza y estimadores para capacidad antioxidante por ABTS en muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide

Análisis de covarianza						Estimadores					
GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Pr(>F)	R <sup>2</sup>	Estimador	Desviación estándar	Valor de t	Pr(> t )		
<b>Muestra cruda</b>											
						<b>Intercepto</b>	7522,56	50,70	148,36	0	
<b>CP1</b>	1	38534505,8	38534505,8	20,82	5,9424x10 <sup>-6</sup>	33,57	<b>CP1</b>	-67,37	14,76	-4,56	5,94x10 <sup>-6</sup>
<b>CP2</b>	1	26081880,1	26081880,1	14,09	0,00018834	22,72	<b>CP2</b>	60,39	16,09	3,75	0,0001883
<b>CP3</b>	1	7415824,42	7415824,42	4,01	0,04570512	6,46	<b>CP3</b>	-49,45	24,71	-2,00	0,045705
<b>CP4</b>	1	40894168,4	40894168,4	22,09	3,117 x10 <sup>-6</sup>	35,63	<b>CP4</b>	-213,78	45,48	-4,70	3,12x10 <sup>-6</sup>
<b>Residual</b>	715	1323459838	1850992,78			1,612					
<b>Muestra cocida</b>											
						<b>Intercepto</b>	9199,46	57,43	160,19	0	
<b>CP1</b>	1	24020649,2	24020649,2	10,12	0,00153334	16,64	<b>CP1</b>	-53,18	16,72	-3,18	0,001533
<b>CP2</b>	1	20568046,3	20568046,3	8,66	0,00335437	14,25	<b>CP2</b>	53,64	18,22	2,94	0,003354
<b>CP3</b>	1	13565885,4	13565885,4	5,71	0,01709651	9,39	<b>CP3</b>	-66,88	27,98	-2,39	0,017096
<b>CP4</b>	1	83846121,2	83846121,2	35,31	4,390x10 <sup>-9</sup>	58,07	<b>CP4</b>	-306,12	51,52	-5,94	4,390x10 <sup>-9</sup>
<b>Residual</b>	715	1697778111	2374514,84			1,64					
<b>Contribución en unidades estándar a partir de estimadores</b>											
<b>Muestra cruda</b>						<b>Muestra cocida</b>					
<b>Variables climáticas y características del suelo</b>	<b>Unidad estándar CP1</b>	<b>Variables climáticas y características del suelo</b>	<b>Unidad estándar CP2</b>	<b>Variables climáticas y características del suelo</b>	<b>Unidad estándar CP4</b>	<b>Unidad estándar CP4</b>					
Grados días acumulado al ciclo del cultivo	18,46*	Al intercambiable	-17,45	K intercambiable	98,77	141,43					
Temperatura media al ciclo del cultivo	18,32	P disponible	-17,45	Días a cosecha	70,55	101,02					
Fe disponible	18,19	Acidez	-16,97	Temperatura máxima a 60 días antes de cosecha	65,20	93,37					
Temperatura mínima a 60 días antes de cosecha	17,99	Mg intercambiable	16,31	Conductividad eléctrica	-61,78	-88,47					
CICE	16,91	Ca intercambiable	16,24	Cu disponible	-59,43	-85,10					
Precipitación a 60 días antes de cosecha	16,84	Grados días acumulados a 60 días antes de cosecha	15,34	Temperatura mínima al ciclo del cultivo	57,72	82,65					
Cu disponible	15,90	Mn disponible	-14,92	Precipitación a 60 días antes de cosecha	55,79	79,90					
pH	-15,70	S disponible	14,13								
Altitud	-15,22										

Nota. \*Unidad estándar = Estimador x Factor del CP (Tabla 15)

### ▪ Capacidad antioxidante por FRAP

En la Tabla 17 se presenta el análisis de covarianza de los CP como covariables y las contribuciones a partir de los estimadores para la CAO por FRAP. Para muestras crudas los CP significativos con mayor peso en la respuesta de la variable CAO por FRAP fueron CP1 y CP2 con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 56,00 y 41,47% respectivamente. En muestras cocidas las covariables significativas fueron CP2 y CP4 con valor de  $R^2$  de 64,79% y 25,14% en su orden. Dada la alta contribución de la covariable CP2 se privilegia su análisis en el estudio.

En la covariable CP1 para muestras crudas, las variables de mayor contribución a la respuesta de la variable fueron las mismas descritas en la variable CAO por ABTS (grados días acumulados, temperatura media al ciclo de cultivo, temperatura mínima a 60 días antes de cosecha y Fe disponible). Estas variables presentaron efecto positivo sobre la respuesta de la variable CAO por FRAP, es decir, por cada unidad de incremento de las variables mencionadas la respuesta de la CAO por FRAP en los genotipos evaluados se aumentó entre 0,48 y 0,49 unidades estándar (Tabla 17). Las variables involucradas son principalmente climáticas e importantes porque la papa es sensible a los cambios climáticos que afectan el ciclo fenológico del cultivo y con ello, la formación y la calidad del tubérculo (Martin-Martin y Jerez-Mompie, 2017).

Para la covariable CP2 tanto en muestra cruda como en muestra cocida, las variables de mayor peso fueron Al intercambiable, P disponible y acidez del suelo con efecto negativo en la respuesta de la variable CAO por FRAP. En este caso al aumentar una unidad de estas variables, conllevan a la disminución de la respuesta de la CAO por FRAP en unidades estándar para muestra cruda de -0,47 a -0,49 y para muestra cocida de -0,63 a -0,65 (Tabla 17). La papa presenta un alto nivel de tolerancia a los niveles de Al intercambiable presentes en los suelos paperos. Si el suelo tiene un alto grado de acidez, el fósforo es retenido fácilmente por los iones Fe y Al (Guerrero-Riascos, 1998). Bajas concentraciones de Al o tiempos cortos de exposición del Al pueden causar inhibición significativa de la elongación de la raíz (Barceló y Poschenrieder, 2002). Los iones aluminio ( $Al^{3+}$ ) se solubilizan y pueden penetrar células radiculares, lo cual inhibe el crecimiento de las raíces y dificulta la absorción de agua y nutrientes esenciales como P y Ca (Kochian et al., 2015). El Al en la planta puede causar disfunción mitocondrial,

inhibe la respiración celular, reduce el adenosín trifosfato (ATP) y favorece la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Carreño y Chaparro-Giraldo, 2013).

**Tabla 17.** Análisis de covarianza y estimadores para capacidad antioxidante por FRAP en muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide

Análisis de covarianza						Estimadores					
GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Pr(>F)	R <sup>2</sup>	Estimador	Desviación estándar	Valor de t	Pr(> t )		
<b>Muestra cruda</b>											
						<b>Intercepto</b>	92,96	0,91	101,76	0	
<b>CP1</b>	1	27453,71	27453,7117	45,69	2,8x10 <sup>-11</sup>	56,00	<b>CP1</b>	-1,79	0,26	-6,76	2,8x10 <sup>-11</sup>
<b>CP2</b>	1	20330,03	20330,0344	33,84	9,02x10 <sup>-9</sup>	41,47	<b>CP2</b>	1,68	0,29	5,82	9,02x10 <sup>-9</sup>
<b>CP3</b>	1	56,48018	56,480181	0,09	0,759225	0,11	<b>CP3</b>	0,14	0,44	0,31	0,759225
<b>CP4</b>	1	581,7159	581,715947	0,97	0,325442	1,18	<b>CP4</b>	-0,81	0,82	-0,981	0,325442
<b>Residual</b>	715	429552,6	600,772954			1,22					
<b>Muestra cocida</b>											
						<b>Intercepto</b>	196,98	1,83	107,61	0	
<b>CP1</b>	1	2939,073	2939,07342	1,22	0,270052	5,29	<b>CP1</b>	-0,58	0,53	-1,10	0,270052
<b>CP2</b>	1	35934,56	35934,5612	14,89	0,000123	64,79	<b>CP2</b>	2,24	0,58	3,86	0,000123
<b>CP3</b>	1	233,6796	233,679613	0,09	0,755709	0,42	<b>CP3</b>	-0,27	0,89	-0,31	0,755709
<b>CP4</b>	1	13942,45	13942,4548	5,78	0,016465	25,14	<b>CP4</b>	-3,94	1,64	-2,40	0,016465
<b>Residual</b>	715	1724798,	2412,30619			4,35					
<b>Contribución en unidades estándar a partir de estimadores</b>											
<b>Muestra cruda</b>						<b>Muestra cocida</b>					
<b>Variables climáticas y características del suelo</b>			<b>Unidad estándar CP1</b>	<b>Variables climáticas y características del suelo</b>			<b>Unidad estándar CP2</b>	<b>Unidad estándar CP2</b>			
Grados días acumulado al ciclo del cultivo			0,49*	Al intercambiable			-0,49	-0,65			
Temperatura media al ciclo del cultivo			0,49	P disponible			-0,49	-0,65			
Fe disponible			0,48	Acidez			-0,47	-0,63			
Temperatura mínima a 60 días antes de cosecha			0,48	Mg intercambiable			0,45	0,60			
CICE			0,45	Ca intercambiable			0,45	0,60			
Precipitación a 60 días antes de cosecha			0,45	Grados días acumulados a 60 días antes de cosecha			0,43	0,57			
Cu disponible			0,42	Mn disponible			-0,41	-0,55			
pH			-0,42	S disponible			0,39	0,52			
Altitud			-0,40								

Nota. \*Unidad estándar = Estimador x Factor del CP (Tabla 15)

## ■ Fenoles totales

En la Tabla 18 se muestra el análisis de covarianza de CP y las contribuciones de las variables climáticas más las características fisicoquímicas del suelo, a partir de los estimadores para fenoles totales. En muestras crudas de los genotipos de papa diploide evaluados, las covariables CP1 y CP2 contribuyeron en la explicación de la covarianza con R<sup>2</sup> de 37,41 y 35,42% en su orden. De manera similar a las variables mencionadas

de CAO ocurre para fenoles totales, es decir, las covariables CP1 y CP2 están presentes en la contribución de estimadores.

Las variables climáticas (grados días acumulados al ciclo de cultivo, temperatura media al ciclo de cultivo y temperatura mínima a 60 días antes de cosecha) que mayormente contribuyeron en la covariable CP1 al aumentar una unidad, la respuesta de fenoles totales en los genotipos evaluados se incrementó en un rango de 0,65 a 0,67 unidades estándar (Tabla 18). Es importante anotar que las variables climáticas inciden en el crecimiento y el desarrollo de los cultivos (Moragues y McMaster, 2012). Así mismo, Lizarazo-Peña et al. (2022) demuestran la importancia de la altitud, de la temperatura y de la radiación solar, que favorecen el desarrollo de la planta, la formación y la calidad del tubérculo en genotipos promisorios con pigmentaciones, que contienen compuestos fenólicos, antocianinas y carotenoides, los cuales se pueden ver afectados en su contenido por prácticas agronómicas (López-Rodríguez, 2019) y condiciones climáticas. Los grados días acumulados es una variable importante para la formación de los compuestos fenólicos en la planta y están regulados a nivel genético e influenciados por factores ambientales como la radiación UV y la sequía, entre otros (Bianeth-Peña y Restrepo, 2013).

En cuanto a la covariable CP2 en muestra cruda, principalmente si se aumenta una unidad de Al intercambiable, P disponible y acidez, se disminuye la respuesta de fenoles totales por ser negativo entre -0,72 a -0,75 unidades estándar (Tabla 18). El P es un elemento que se encuentra fijado en el suelo y se han realizado estudios de fertilización para determinar si inciden positiva o negativamente su disponibilidad para la planta y para la formación de compuestos antioxidantes en los tubérculos. Entre estos estudios, Vaitkevičienė et al. (2019) propusieron aplicar al cultivar Vitelotte un preparado con estiércol fermentado, más P disponible ( $P_2O_5$ ) en dosis de  $1751,96 \text{ mg.kg}^{-1}$ , K disponible ( $K_2O$ ) con  $259,20 \text{ mg.kg}^{-1}$ , N con 2,10%, pH de 6,96 en el suelo, enzima ureasa con  $1,56 \text{ mg NH}_3$  1 g de suelo por 24 h y enzima sacarasa con  $32,7 \text{ mg}$  de glucosa en 1 g de suelo cada 48 h. Los resultados indicaron que el preparado estimuló la actividad de las enzimas del suelo sacarasa y ureasa y aumentó el contenido de nutrientes como P disponible para el crecimiento de las plantas. La composición química de los tubérculos presentó mayor contenido significativo de compuestos fenólicos, antocianinas y mayor actividad antirradical.

En el caso de las muestras cocidas, la covariables CP4 fue de mayor peso con un R<sup>2</sup> de 67,82%. El K intercambiable en ésta covariable, como se muestra en la Tabla 18, si aumenta una unidad la respuesta de fenoles totales es un incremento de 5,05 unidades estándar. Este elemento participa en la síntesis bioquímica de los metabolitos secundarios de las plantas como los compuestos fenólicos (López-Martínez et al., 2017; Mohd Zain e Ismail, 2016).

**Tabla 18.** Análisis de covarianza y estimadores para fenoles totales en muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide

Análisis de covarianza						Estimadores					
GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Pr(>F)	R <sup>2</sup>	Estimador	Desviación estándar	Valor de t	Pr(> t )		
<b>Muestra cruda</b>											
						Intercepto	227,27	1,90	119,43	0	
CP1	1	50305,14	50305,14	19,29	1,28x10 <sup>5</sup>	37,41	CP1	-2,43	0,55	-4,39	1,28x10 <sup>5</sup>
CP2	1	47633,77	47633,77	18,27	2,17x10 <sup>5</sup>	35,42	CP2	2,58	0,60	4,27	2,17x10 <sup>5</sup>
CP3	1	21101,98	21101,98	8,09	0,00456	15,69	CP3	-2,64	0,93	-2,84	0,004567
CP4	1	12822,29	12822,29	4,92	0,02688	9,53	CP4	-3,78	1,71	-2,22	0,026887
Residual	715	1864058,75	2607,07			1,94					
<b>Muestra cocida</b>											
						Intercepto	325,31	2,32	140,10	0	
CP1	1	13113,1403	13113,14	3,37	0,06648	8,32	CP1	-1,24	0,67	-1,83	0,06648
CP2	1	17805,8217	17805,82	4,58	0,03255	11,30	CP2	1,58	0,73	2,14	0,03255
CP3	1	15886,2096	15886,20	4,09	0,04344	10,08	CP3	-2,28	1,13	-2,02	0,04344
CP4	1	106825,277	106825,2	27,51	2,05x10 <sup>7</sup>	67,82	CP4	-10,92	2,08	-5,24	2,05x10 <sup>7</sup>
Residual	715	2775551,96	3881,890			2,46					
<b>Contribución en unidades estándar a partir de estimadores</b>											
<b>Muestra cruda</b>						<b>Muestra cocida</b>					
Variables climáticas y características del suelo		Unidad estándar CP1	Variables climáticas y características del suelo		Unidad estándar CP2	Variables climáticas y características del suelo		Unidad estándar CP4			
Grados días acumulado al ciclo del cultivo		0,67*	Al intercambiable		-0,75	K intercambiable		5,05			
Temperatura media al ciclo del cultivo		0,66	P disponible		-0,75	Días a cosecha		3,60			
Fe disponible		0,66	Acidez		-0,72	Temperatura máxima a 60 días antes de cosecha		3,33			
Temperatura mínima a 60 días antes de cosecha		0,65	Mg intercambiable		0,70	Conductividad eléctrica		-3,15			
CICE		0,61	Ca intercambiable		0,70	Cu disponible		-3,04			
Precipitación a 60 días antes de cosecha		0,61	Grados días acumulados a 60 días antes de cosecha		0,66	Temperatura mínima al ciclo del cultivo		2,95			
Cu disponible		0,57	Mn disponible		-0,64	Precipitación a 60 días antes de cosecha		2,85			
pH		-0,57	S disponible		0,60						
Altitud		-0,55									

Nota. \*Unidad estándar = Estimador x Factor del CP (Tabla 15)

## ▪ Vitamina C

En el análisis de covarianza a partir de los CP y las contribuciones de las variables climáticas y características fisicoquímicas del suelo desde los estimadores para vitamina C, se observa en la Tabla 19. En general tanto para muestras crudas como muestras cocidas, se obtuvieron contribuciones a partir de los estimadores con valores cercanos a cero.

En muestras crudas la covariable CP2 fue la de mayor contribución a la covarianza en términos de  $R^2$  (92,66%). Las características fisicoquímicas del suelo como Al intercambiable, P disponible y acidez en esta covariable, presentaron contribución negativa para la respuesta de vitamina C en los genotipos estudiados, es así que, por cada unidad de aumento de estas características fisicoquímicas de suelo la respuesta de vitamina C se disminuye entre -0,03 a -0,02 unidades estándar. Xing et al. (2020) analizaron la influencia del contenido de agua, N y P en el suelo del cultivo de papa para favorecer la producción de vitamina C en los tubérculos, de lo cual se deduce la importancia de la contribución del P disponible para esta variable evaluada.

En muestras cocidas, las covariables CP1 y CP3 sobresalieron su aporte en la covarianza con valores en  $R^2$  de 60,62 y 30,45% (Tabla 19), respectivamente. En la covariable CP1 resaltaron grados días acumulados al ciclo de cultivo, temperatura media al ciclo de cultivo y temperatura mínima a los 60 días antes de cosecha como variables determinantes en el desarrollo y crecimiento de la planta, tanto en órganos vegetativos y reproductivos, y con ello el desarrollo de compuestos, como la vitamina C. Por ser la planta de papa termoperiódica, es imprescindible considerar las variaciones de temperatura que suceden en el día y en la noche (Vargas-Camacho et al., 2020; Moreno y Oropeza, 2017; Rykaczewska, 2013).

El Zn disponible repuntó en la covariable CP3 con valor de 0,04 unidades estándar y es un micronutriente esencial en la nutrición de las plantas de papa para la formación de sacarosa, almidón y producción de semillas; como también, es un elemento que favorece el proceso de la enzima superóxido dismutasa en su síntesis para evitar el daño en el fotosistema de la planta (Rana y Jhila, 2021; Sarmah y Paul, 2022). Mondy et al. (1993) investigaron los efectos de la fertilización con Zn sobre el ácido ascórbico y la concentración de minerales en papa durante 2 años. Aplicaron bandas de sulfato de zinc

(ZnSO<sub>4</sub>) a la siembra en dosis de 11,2 a 224 kg/ha en dos localidades. En el segundo año, aplicaron en bandas a la siembra dosis de 0; 22,4; 44,8 y 112 hg/ha de ZnSO<sub>4</sub> en una de las localidades. El mayor contenido de ácido ascórbico o vitamina C en los tubérculos se obtuvo con el tratamiento de 112 kg/ha de ZnSO<sub>4</sub>.

**Tabla 19.** Análisis de covarianza y estimadores para vitamina C en muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide

Análisis de covarianza						Estimadores				
GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Pr(>F)	R <sup>2</sup>	Estimador	Desviación estándar	Valor de t	Pr(> t )	
<b>Muestra cruda</b>										
						Intercepto	15,30	0,06	242,88	0
CP1	1	0,01800	0,01800	0,006	0,936	CP1	-0,0015	0,02	-0,08	0,9367
CP2	1	64,8210	64,8210	22,68	2,3x10 <sup>-6</sup>	CP2	0,095	0,02	4,76	2,3x10 <sup>-6</sup>
CP3	1	0,39970	0,3997	0,139	0,708	CP3	-0,01	0,03	-0,37	0,7085
CP4	1	1,85763	1,8576	0,650	0,420	CP4	0,045	0,05	0,81	0,4203
Residual	715	2042,93	2,8572		4,08					
<b>Muestra cocida</b>										
						Intercepto	7,396	0,042	175,88	0
CP1	1	82,3091	82,3091	64,64	3,7x10 <sup>-15</sup>	CP1	-0,098	0,012	-8,04	3,7x10 <sup>-15</sup>
CP2	1	3,8162	3,8162	2,99	0,08	CP2	-0,023	0,013	-1,73	0,083
CP3	1	41,3411	41,3411	32,46	1,7x10 <sup>-8</sup>	CP3	0,116	0,020	5,69	1,7x10 <sup>-8</sup>
CP4	1	7,0302	7,0302	5,52	0,02	CP4	-0,088	0,037	-2,35	0,019
Residual	715	910,420	1,27331		0,93					
<b>Contribución en unidades estándar a partir de estimadores</b>										
Muestra cruda		Muestra cocida								
Variables climáticas y características del suelo	Unidad estándar CP2	Variables climáticas y características del suelo	Unidad estándar CP1	Variables climáticas y características del suelo	Unidad estándar CP3					
Al intercambiable	-0,03*	Grados días acumulados al ciclo del cultivo	0,03	Zn disponible	0,04					
P disponible	-0,03	Temperatura media al ciclo del cultivo	0,03	Altitud	-0,03					
Acidez	-0,03	Fe disponible	0,03	K intercambiable	0,03					
Mg intercambiable	0,03	Temperatura mínima a 60 días antes de cosecha	0,03	B disponible	0,03					
Ca intercambiable	0,03	CICE	0,02	Precipitación al ciclo del cultivo	-0,03					
Grados días acumulados a 60 días antes de cosecha	0,02	Precipitación a 60 días antes de cosecha	0,02	CICE	0,03					
Mn disponible	-0,02	Cu disponible	0,02	Grados días acumulados a 60 días antes de cosecha	-0,03					
S disponible	0,02	pH	-0,02	Cu disponible	-0,03					
		Altitud	-0,02							

Nota. \*Unidad estándar = Estimador x Factor del CP (Tabla 15)

En la covariable CP3 además contribuyó el micronutriente B disponible, con un aumento de 0,03 unidades estándar en la respuesta de vitamina C cuando se aumenta una unidad de este micronutriente. El B interviene en la planta a nivel celular y funcional, participa en

el transporte de los carbohidratos y es útil en la absorción de Ca en dosis reguladas (Kohar et al., 2023; Singh et al., 2012). Mondy y Munshi (1993) evaluaron la fertilización foliar con B, la cual aumenta la concentración de ácido ascórbico en los tubérculos de papa, enriqueciéndolos nutricionalmente.

En resumen, al contrastar los resultados estadísticos de las contribuciones de las variables climáticas en los ocho ambientes a partir de los estimadores en unidades estándar, se verificó la interrelación de grados días acumulados, precipitación y temperaturas puesto que hacen parte de las covariables CP1, CP2 y CP4. En el municipio de El Rosal se presentó condiciones óptimas de temperatura y de grados días acumulados tanto a los 60 días antes de la cosecha como al momento de culminar el cultivo en los dos ambientes.

Así mismo, al contrastar las contribuciones estadísticas de las características fisicoquímicas del suelo de los ambientes excepto los del municipio de El Rosal, se pudo constatar que presentaron condiciones de fertilidad media que permitió un desarrollo normal de las plantas y a la vez un crecimiento de una formación de tubérculos óptima, con las cuales se desarrollaron las determinaciones de capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C.

## 2.4 Conclusiones

En la respuesta de la capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP, y fenoles totales en muestras crudas de los genotipos de papa diploide, las variables de mayores efectos las variables climáticas: grados días acumulados al ciclo del cultivo, temperatura media al ciclo del cultivo y temperatura mínima a 60 días antes de cosecha; y de las características fisicoquímicas del suelo como Al intercambiable, P disponible y acidez.

Se identificaron los genotipos de papa diploide Chaucha Piña, G1985 y G2020 en muestras crudas y cocidas con valores sobresalientes de capacidad antioxidante por ABTS entre 9155,12 a 9405,94  $\mu\text{mol Trolox}/100 \text{ g BS}$  (cruda) y entre 11067,49 a 11266,22  $\mu\text{mol Trolox}/100 \text{ g BS}$  (cocida). Los genotipos G2020, Chaucha Piña y G0077 sobresalieron por los contenidos de fenoles totales entre 286,81 a 298,12 EAG/100 g BS (muestra cruda) y entre 397,43 a 402,41 EAG/100 g BS (muestra cocida).

La vitamina C que no se correlacionó con fenoles totales, capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP. En muestras crudas se destacaron el genotipo G2021, las variedades comerciales Criolla Guaneña y Criolla Colombia con valores entre 16,21 a 16,59 mg AA/100 g BS. En muestras cocidas sobresalieron los genotipos con mayor porcentaje de retención de vitamina C de 55 y 56%, como G2585, G1998 y G2010 con valores de la variable entre 8,02 a 8,63 mg AA/100 g BS.

## 2.5 Bibliografía

- Abaunza, C.A., Cerón, M.S., Molina, Y., Ortiz, L.A. (2022). Identificación de zonas de producción de papa diploide (*Solanum phureja* Juz. et. Buk.). En M.S. Cerón, L. Prieto, A.M. Garnica y J. Gabriel Ortega (Eds.), *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia* (pp. 21-66). Editorial Grupo Compás. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/38028>
- Agronet. (2024). Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. Red de Información y comunicación del sector agropecuario colombiano. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia [MADR]. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Barceló, J., Poschenrieder, C. (2002). Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminum toxicity and resistance: a review. *Environmental and Experimental Botany*, 48(1), 75-92, [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(02\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(02)00013-8)
- Barragán-Condori, M., Aro-Aro, J.M. (2017). Determinación del efecto de procesos de cocción en papas nativas pigmentadas (*Solanum tuberosum* spp. *andigena*) sobre sus compuestos bioactivos. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(1), 47-52. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2017.254>
- Benzie I.F., Strain J.J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of Antioxidant Power: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Bianeth-Peña, C., Restrepo, L.P. (2013). Compuestos fenólicos y carotenoides en la papa: revisión. *Actual. Nutr.*, 25-32. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-771538>

- Bonierbale, M., Burgos Zapata, G., Zum Felde, T., Sosa, P. (2010). Composition nutritionnelle des pommes de terre. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 45(6), S28-S36. [https://doi.org/10.1016/S0007-9960\(10\)70005-5](https://doi.org/10.1016/S0007-9960(10)70005-5)
- Burgos, G., Sosa, P., Chacaltana, C., Muñoa, L., Scurrah, M., Salas, E., Ccanto, R., Díaz, F., Felde, T. (2021). Iron concentration of potato and sweet potato clones as affected by location. *Journal of Agriculture and Food Research* 3, 100100. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100100>
- Burgos, G., Amoros, W., Salas, E., Muñoa, L., Sosa, P., Cayhualla, E., Sanchez, C., Díaz, C., Bonierbale, M. (2013). Total phenolic, total anthocyanin and phenolic acid concentrations and antioxidant activity of purple-fleshed potatoes as affected by boiling. *Journal of Food Composition and Analysis*, 30(1), 6–12.
- Burgos, G., Auqui, S., Amoros, W., Salas, E., Bonierbale, M. (2009a) Ascorbic acid concentration of native Andean potato varieties as affected by environment, cooking and storage. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(6), 533-538. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.05.013>
- Burgos, G., Salas, E., Muñoa, L., Sosa, P., Auqui, M., Amoros, W., Bonierbale, M. (2009b). Concentration of ascorbic acid, carotenoids, total phenolics and total anthocyanins in cooked potatoes. *International Society for Tropical Root Crops (ISTRIC)*, 41-46.
- Carreño, A., Chaparro-Giraldo, A. (2013). Tolerancia al aluminio en especies vegetales: mecanismos y genes. *Universitas Scientiarum*, 18(3), 283 - 310 <https://doi.org/10.11144/Javeriana.SC18-3.taev>
- Casierra-Posada, F., Aguilar-Avenidaño, O. (2018). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 1, 246-257. DOI: <https://doi.org/10.17584/rcch.2007v1i2.8701>
- Castilla, L. (2006). La biofertilización en el manejo integrado de nutrientes para la nutrición vegetal. En: *Biofertilización: Alternativa viable para la nutrición vegetal*, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Capítulo Tolima.
- Cerón, M.S., Álvarez, C.P., Prieto, L., Hernández, M.A., Cusgüen, I., Pérez, M.A., Caicedo, M., Becerra, E., Chalabi, N. (2013). Sembrando la semilla de competitividad sostenible en la cadena: papa criolla de Cundinamarca, Colombia. En P. Henríquez y H. Li Pun (Eds), *Innovaciones De Impacto: Lecciones De La Agricultura Familiar En América Latina y El Caribe* (pp.91 – 104). Banco

- Interamericano de Desarrollo (BID) e Instituto Interamericano de Cooperación (IICA). <http://bit.ly/37kw8Fo>
- Covarrubias-Ramírez, J.M., Zermeño-González, A., Parga-Torres, V.M., Briones-Sánchez, G., Troyo-Diéguez, E. (2019). Aplicación de Días grado de crecimiento en el cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L.) para estimar el abatimiento del agua en el suelo. *Acta universitaria*, 29, e2033. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2033>
- Crespo-Relucio, G.M. (2009). Estudio del proceso de cocción de patata violette (*Solanum tuberosum* var. Blue). [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. <http://hdl.handle.net/10251/14364>
- Crossa, J., Gauch, H.G., Zobel, R.W. (1990). Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Science*. 30, 493-500.
- Ezekiel, R., Singh, N., Sharma, S., Kaur, A. (2013). Beneficial phytochemicals in potato: A review. *Food Research International*, 50(2), 487-496.
- Fang, H., Yin, X., He, J., Xin, S., Zhang, H., Ye, X., Yang, Y., Tian, J. (2022). Cooking methods affected the phytochemicals and antioxidant activities of potato from different varieties, *Food Chemistry*: X, 14, 100339, <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100339>.
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Mejía-Sáenz, E., Sifuentes-Ibarra, E. (2012). Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana*, 30(1), 59-67. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-57792012000100059&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000100059&lng=es&tlng=es)
- Flores-Magdaleno, H., Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W. (2014). Predicción fenológica del cultivo de papa mediante tiempo térmico. *Revista fitotecnia mexicana*, 37(2), 149-157. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802014000200006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802014000200006&lng=es&tlng=es)
- Gabriel, J., Botello, R., Angulo, A., Velasco, C., Casazola, J., Vera, R., Rodríguez, F. (2015). Papas nativas con alto contenido de hierro y zinc: un aporte a la nutrición de las familias bolivianas. En Fundación PROINPA. *Informe compendio 2011-2014* (pp. 6-11). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4214.4480>

- Gabriel, J., Veramendi, S., Angulo, A., Magne, J. (2013). Respuesta de variedades mejoradas de papa (*Solanum tuberosum* L.) al estrés hídrico por sequía. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 1(1), 33-44.  
[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2308-38592013000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592013000100004&lng=es&tlng=es).
- Gao, Y., Tang, Z., Xia, H., Sheng, M., Liu, M., Pan, S., Li, Z., Liu, J. (2021). Potassium Fertilization stimulates sucrose-to-starch conversion and root formation in sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.). *International Journal of Molecular Sciences*. 22(9):4826. <https://doi.org/10.3390/ijms22094826>
- García, A.E. (2011). *Evaluación in vitro/In vivo de propiedades antioxidantes de clones promisorios de papa criolla (Solanum phureja)*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- García-Gómez, C., Obrador, A., González, D., Babín, M., Fernández, M.D. (2017). Comparative effect of ZnO NPs, ZnO bulk and ZnSO<sub>4</sub> in the antioxidant defences of two plant species growing in two agricultural soils under greenhouse conditions. *The Science of the total environment*, 589, 11–24.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.153>
- Garnica, A.M., Prieto, L., Álvarez, C.P., Poveda, J.C., Cerón, M.S., Molina, Y. (2022). Análisis Físico y Nutricional de Tubérculos de Papa Diploide (*Solanum phureja* Juz. et Buk). En M.S. Cerón, L. Prieto, A.M. Garnica y J. Gabriel Ortega (Eds.), *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia* (pp. 357-390). Editorial Grupo Compás.  
<http://hdl.handle.net/20.500.12324/37999>
- Giusti, M.M., Polit, M.F., Ayzav, H., Tay, D., Manrique, I. (2014). Characterization and quantitation of anthocyanins and other phenolics in native Andean potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(19), 4408–4416.  
<https://doi.org/10.1021/jf500655n>
- Guerrero-Riascos, R. (1998). *Fertilización de cultivos en clima frío*. 2 edición. Monómeros Colombo-Venezolanos S.A. (E.M.A.). Colombia, p. 370
- Kochian, L.V., Piñeros, M.A., Liu, J., Magalhaes, J.V. (2015). Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 66, 571–598. [doi: 10.1146/annurev-arplant-043014-114822](https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822)
- Hamouz, K., Lachman, J., Pazderů, K., Hejtmánková, K., Cimr, J., Musilová, J., Pivec, V., Orsák, M., Svobodová, A. (2013). Effect of cultivar, location and method of

- cultivation on the content of chlorogenic acid in potatoes with different flesh colour. *Plant, Soil and Environment*, 59(10), 465-471. <https://doi.org/10.17221/460/2013-PSE>
- Hawkes, J.G. (1990). *The Potato: Evolution, Biodiversity and Genetic Resources*. Belhaven Press.
- Hualla M., V.R. (2017). *Ganancias genéticas en el contenido de hierro y zinc en papas diploides en tres ciclos de selección recurrente*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Huamán, Z. (2008). *Descriptores morfológicos de la papa (Solanum tuberosum L.)*. Centro de Conservación de la Biodiversidad Agrícola de Tenerife (CCBAT).
- Humphries, J.M., Stangoulis, J.C.R., Graham, R.D. (2006). Manganese. En A.V. Barker, D.J. Pilbeam, *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 351-356). Taylor & Francis Group.
- Inostroza, J., Méndez, P., Sotomayor, L. (2009). *Botánica y morfología de la papa*. Temuco: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. No. 193. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7281>
- International Organization for Standardization [ISO]. (2016). *ISO 3310-1: Test sieves - Technical requirements and testing - Part 1: Test sieves of metal wire cloth*.
- Ji, X., Rivers, L., Zielinski, Z., Xu, M. MacDougall, E., Stephen, J., Zhang, S., Wang, Y., Chapman, R., Keddy, P., Robertson, G., Kirby, C., Embleton, J., Worrall, K., Murphy, A., De Koeyer, D., Tai, H., Yu, L., Charter, E., Zhang, J. (2012). Quantitative analysis of phenolic components and glycoalkaloids from 20 potato clones and in vitro evaluation of antioxidant, cholesterol uptake, and neuroprotective activities. *Food Chemistry*. 133. 1177-1187. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.065>
- Jiménez, J.C., Moreno, L.P., Magnitskiy, S. (2012). Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 96-109. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2011-21732012000100010&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732012000100010&lng=en&tlng=es).
- Kohar, D., Gupta, A., Siwakoti, P.P., Gouli, S., Shrestha, P., Sah, R. (2023). Effect of zinc and boron on the performance of rainy season local potato variety "Sete" (*Solanum tuberosum* L.) at Rukumkot, Rukum East, Nepal. *Archives of Agriculture and Environmental Science*. 8,157-161, [doi:10.26832/24566632.2023.0802010](https://doi.org/10.26832/24566632.2023.0802010)

- Külen, O., Stushnoff, C., Holm, D.G. (2013). Effect of cold storage on total phenolics content, antioxidant activity and vitamin C level of selected potato clones. *Journal of the science of food and agriculture*, 93(10), 2437–2444. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6053>
- Liu, Z. (2010). Chemical methods to evaluate antioxidant ability. *Chemical Reviews*, 110(10), 5675–5691. <https://doi.org/10.1021/cr900302x>
- Lizarazo-Peña, P.A., Moreno-Fonseca, L.P., Núñez-López, C.E. (2022). Rendimiento y variables poscosecha de cultivares de papa del grupo Phureja en ambientes contrastantes por altitud de la región Andina central de Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2). [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num2\\_art:2197](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2197)
- Loannou, I., Hafsa, I., Hamdi, S., Charbonnel, C., Ghoul, M. (2012). Review of the effects of food processing and formulation on flavonol and anthocyanin behavior. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 208–217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.006>
- López-Martínez, J.D., Salas-Pérez, L., Valenzuela-Soto, R., Borroel-García, V.J., Preciado-Rangel, P., Ramírez-Seañez, A.R. (2017). Efecto del potasio en el contenido fenólico y capacidad antioxidante de *Ocimum basilicum* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 133-145. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.77>
- López-Olivari, R., Zuñiga-Sánchez, M. (2019). *Manejo del agua de riego en el cultivo de Papa* [en línea]. Temuco: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. No. 414. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6869>
- López-Rodríguez, M.M., Núñez-López, C.E. (2020). Antioxidant compounds in diploid potato: Effect of the foliar application of magnesium and manganese. *Agronomía Colombiana*, 38(3), 325-334. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v38n3.79629>
- López-Rodríguez, M. (2019). Compuestos fenólicos, carotenoides y actividad antioxidante en papa diploide con fertilización foliar de magnesio y manganeso. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69813>
- Martín-Martin, R., Jerez-Mompie, E. (2017). Efecto de las temperaturas en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Romano. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 75-80. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362017000100009&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000100009&lng=es&tlng=es)

- Mohd Zain, N.A., Ismail, M.R. (2016). Effects of potassium rates and types on growth, leaf gas exchange and biochemical changes in rice (*Oryza sativa*) planted under cyclic water stress. *Agric. Water Manag.* 164,83-90.
- Molina, Y., Rabe, G., Rodríguez, M.L., Cerón, M.S., Garnica, A.M. (2015). Contenido de antioxidantes en papas criollas nativas (*Solanum tuberosum* grupo Phureja) en procesos de precocción y congelación. *Alimentos Hoy*, 23(36), 31-41.
- Mondy, N.I., Chandra, S., Monsh, B. (1993). Zinc fertilizer increases ascorbic acid and mineral contents of potatoes. *J. Food Sci.*, 58: 1375-1377. [DOI:10.1111/j.1365-2621.1993.tb06186.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb06186.x)
- Mondy, N.I., Munshi, C.B. (1993). Effect of boron on enzymatic discoloration and phenolic and ascorbic acid contents of potatoes. *J. Agri. Food Chem.* 41(4), 554-556.
- Moragues, M., McMaster, G.S. (2012). Crop Development Related to Temperature and Photoperiod. En: Meyers, R.A. (Eds) *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3\\_384](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_384)
- Moreno, M., Oropeza, M. (2017). Efecto de las hormonas vegetales y el fotoperiodo en la producción de microtubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(2), 25-34.
- Moreno-Guerrero, C., Andrade-Cuvi, M.J., Oña-Pillajo, G., Llumiquinga-Hernández, T., Concellón, A. (2015). Efecto de la cocción sobre la composición química y capacidad antioxidante de papas nativas (*Solanum tuberosum*) del Ecuador. *Ecuador Es Calidad, Revista Científica Ecuatoriana*. 2(2). <https://doi.org/10.36331/revista.v2i2.15>
- Mystkowska, I., Zarzecka, K., Gugala, M., Sikorska, A. (2021). Vitamin C content in edible potato tubers in the conditions of using biostimulators. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*. 71(8): 732-737. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1946584>
- Navarre, D.A., Shakya, R., Hellmann, H. (2016). Vitamins, Phytonutrients, and Minerals in Potato. En J. Singh y L. Kaur (Eds.) *Advances in Potato Chemistry and Technology* (2 ed., pp. 117-166). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800002-1.00006-6>

- Nava, G., Dechen, A., Luchi, V. 2007. Produção de tubérculos de batata-semente em função das adubações nitrogenada, fosfatada e potássica. *Horticultura Brasileira*. 25:365-370. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362007000300009>
- Navarre, D.A., Shakya, R., Holden, M., Kumar, S. (2010). The effect of different cooking methods on phenolics and vitamin C in developmentally young potato tubers. *American Journal of Potato Research*, 87(4), 350–359. <https://doi.org/10.1007/s12230-010-9141-8>
- Ñústez-López, C.E., Rodríguez-Molano, L.E. (2020). Papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja): Manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de Cundinamarca. Bogotá, D. C.: Corredor Tecnológico Agroindustrial CTA-2.
- O'Hara, B. (2020). *No-Till Intensive Vegetable Culture: Pesticide-Free Methods for Restoring*. Chelsea Green Publishing.
- Olivera, Y., Hernández, L., Cruz, D.R., Ramírez, W., Lezcano, J. (2010). Caracterización morfológica de accesiones de la especie *Cynodon dactylon*. *Pastos y Forrajes*, 33(2), 1-11. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269119690004>
- Peña, C., Restrepo-Sánchez, L.P, Kushalappa, A., Rodríguez-Molano, L.E., Mosquera, T., Narváez-Cuenca, C.E. (2015). Nutritional contents of advanced breeding clones of *Solanum tuberosum* group Phureja. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1), 76-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.038>
- Peña-Melo, C.B. (2015). *Evaluación del contenido nutricional y actividad antioxidante en Solanum tuberosum grupo Phureja*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54851>
- Polanco, M. (2016). El papel del análisis por componentes principales en la evaluación de redes de control de la calidad del aire. *Comunicaciones en Estadística*, 9(2), 271-294. <https://doi.org/10.15332/s2027-3355.2016.0002.06>
- Porras, P.D., Herrera, C.A. (2015). *Modelo productivo de la papa criolla para los departamentos de Cundinamarca y Boyacá*. Mosquera, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica].
- Pradhan, A., Deshmukh, J.P. (2011). Study of cation-exchange capacity of soil near fluorspar mining with special reference to Kadipani mine (Gujarat, India). *Journal of*

- Rana, A., Jhilita P. (2021). Improved practices through biological means for sustainable potato production. En: M. Kaushal y R. Prasad (Eds.). *Microbial Biotechnology in Crop Protection* (pp. 189-208). Springer. DOI:10.1007/978-981-16-0049-4\_8
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, Y., Yang, M., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26 (9-10), 1231-1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Restrepo, L.F., Posada, S.L., Noguera, R.R. (2012). Aplicación del análisis por componentes principales en la evaluación de tres variedades de pasto. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 25(2), 258-266.
- Rivadeneira, J., Ortega, D., Morales, V., Monteros, C., Cuesta, X. (2016). Efecto de la interacción genotipo por ambiente sobre los contenidos de hierro, zinc y vitamina C en genotipos de papa (*Solanum* sp.). *Revista Latinoamericana de la Papa*, 20(1), 32-45. <https://doi.org/10.37066/ralap.v20i1.242>
- Rodríguez, L., Corchuelo, G., Núñez C.E. (2004). Densidad de población y su efecto sobre el rendimiento de papa (*Solanum tuberosum* L. cv. Parida pastusa). *Agronomía Colombiana*, 22 (1), 23-31.
- Rykaczewska, K. (2013). The Impact of High Temperature during Growing Season on Potato Cultivars with Different Response to Environmental Stresses. *American Journal of Plant Sciences*, 4 (12), 2386-2393. <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.412295>
- Saldaña-Villota, T.M., Cotes-Torres, J.M. (2020). Functional growth analysis of diploid potato cultivars (*Solanum phureja* Juz. et Buk.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(3), 402–415. <https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i3.10870>
- Samaniego, I., Espin, S., Cuesta, X., Arias, V., Rubio, A., Llerena, W., Angós, I., Carrillo, W. (2020). Analysis of Environmental Conditions Effect in the Phytochemical Composition of Potato (*Solanum tuberosum*) Cultivars. *Plants (Basel, Switzerland)*, 9(7), 815. <https://doi.org/10.3390/plants9070815>
- Santos, C.M. (2010). *Evaluación del crecimiento, desarrollo y componentes de rendimiento de cuatro cultivares de papa criolla en dos localidades del departamento de Cundinamarca* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.

- Sarmah, A., Paul, S. (2022). Zinc nutrition of potato. *AgriCos e-Newsletter* 3 (1), 62-64. [https://www.researchgate.net/publication/357933489\\_ZINC\\_NUTRITION\\_OF\\_POTATO](https://www.researchgate.net/publication/357933489_ZINC_NUTRITION_OF_POTATO)
- SAS Institute. (2004). Statistical Analysis System – SAS (Version 9.0) [Software]. Estados Unidos. [www.sas.com/en](http://www.sas.com/en)
- Shakya, R., Navarre, D.A. (2006). Rapid screening of ascorbic acid, glycoalkaloids, and phenolics in potato using high-performance liquid chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(15), 5253-5260. <https://doi.org/10.1021/jf0605300>
- Singh, D.P., Beloy, J., McInerney, J.K., Day, L. (2012). Impact of boron, calcium and genetic factors on vitamin C, carotenoids, phenolic acids, anthocyanins and antioxidant capacity of carrots (*Daucus carota*). *Food chemistry*, 132(3), 1161–1170. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.11.045>
- Singleton, V., Rossi, J. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16 (3), 144-158
- Suárez-Hernández, P., Rodríguez-Rodríguez, E. M., Díaz-Romero, C. (2004). Cambios en el valor nutritivo de patatas durante distintos tratamientos culinarios. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 4(4), 257-261.
- Taiz, L., Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal*. Volumen II. Publicacions de la Universitat Jaume I, D.L. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FisiologiaVegetalVolumenII%20espanhol.pdf>
- Tian, J. H., Chen, J. L., Lv, F., Chen, S., Chen, J., Liu, D., Ye, X. (2016). Domestic cooking methods affect the phytochemical composition and antioxidant of purple-fleshed potatoes. *Food Chemistry*, 197 Pt B, 1264-1270. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.049>
- Vaitkevičienė, N., Jarienė, E., Ingold, R., Peschke, J. (2019). Effect of biodynamic preparations on the soil biological and agrochemical properties and coloured potato tubers quality. *Open Agriculture*, 4(1), 17-23. <https://doi.org/10.1515/opag-2019-0002>
- Vargas-Camacho, J.C., Plata-Rangel, A.M., Guevara, O. (2020). Diseño participativo de una alerta agroclimática temprana para el cultivo de papa criolla (*Solanum*

- phureja*) en Subchoque, Colombia. *Acta Agronómica*, 69(3). <https://doi.org/10.15446/acag.v69n3.77051>
- Veronica, N., Subrahmanyam, D., Vishnu, T., Yugandhar, P., Bhadana, V., Padma, V., Jayasree, G., Voleti, S. (2017). Influence of low phosphorus concentration on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant response of rice genotypes. *Photosynthetica*, 55(2), 285-293. <https://dx.doi.org/10.1007/s11099-016-0640-4>
- Xing, Y., Niu, X., Wang, N., Jiang, W., Gao, Y., Wang, X. (2020). The correlation between soil nutrient and potato quality in loess plateau of China based on PLSR. *Sustainability* 12, no. 4: 1588. <https://doi.org/10.3390/su12041588>
- Yang, Y., Achaerandio, I., Pujolà, M. (2016). Classification of potato cultivars to establish their processing aptitude. *Journal of the science of food and agriculture*, 96(2), 413–421. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7104>
- Zapata, J.L., Cerón, M.S, Porras, P. D., Herrera, C.A. (2022). Manejo integral del cultivo de papa diploide (*Solanum phureja* Juz. et Buk.). En M. S. Cerón, L. Prieto, A. M. Garnica y J. Gabriel Ortega (Eds.). (2022). *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia*. Editorial Grupo Compás. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/38030>
- Zhang, J., Zhang, J., Cao, W., Zhao, Y., Wang, X., Liu, J. (2021). Understanding changes in global potato production using data from the Food and Agriculture Organization. *Scientific Data*, 8(1), 1-8.
- Zobel, R.W., Wright, M.S., Gauch, H.G. (1988). Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80,388-393. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>
- Zuñiga Chila, S., Morales Espinoza, C., Estrada Martínez, M. (2017). Cultivo de la papa y sus condiciones climáticas. *Gestión Ingenio y Sociedad*, 2(2), 140-152.



### **3. Análisis de estabilidad fenotípica para la capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C en genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja)**

#### **Resumen**

Es fundamental estudiar el recurso genético de papa diploide del banco de germoplasma vegetal (AGROSAVIA) para conocer la respuesta de variables agronómicas y nutricionales, como también su estabilidad fenotípica. A 28 genotipos más dos testigos en muestras crudas y cocidas se realizó la evaluación de la estabilidad fenotípica para las variables fenoles totales, capacidad antioxidante (CAO), vitamina C y rendimiento de tubérculo. Los genotipos se sembraron en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca bajo el diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones, en unidades experimentales de 51 plantas. Para cada variable se realizó análisis de varianza combinado y análisis de estabilidad y de interacción GxA por el modelo AMMI, graficando los resultados en biplots. El genotipo G2593 presentó estabilidad fenotípica para la mayoría de las variables estudiadas en muestras cocidas con valores superiores a los promedios generales (CAO por ABTS 10192,89  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ ; CAO por FRAP 272,62 mg AA/100 g BS y fenoles totales 369,95 mg AEG/100 g BS). Los ambientes del municipio de El Rosal sobresalieron para fenoles totales, CAO por ABTS y por FRAP. El genotipo Botella Roja tuvo mayor estabilidad en vitamina C (15,73 crudo y 7,13 cocido mg AA/100 g BS) con 56% de retención. Los genotipos de mayor estabilidad y rendimiento superior al promedio general fueron G1989, G2590 y G2591 (18561; 19393 y 20552  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  respectivamente). Otros genotipos sobresalientes con buena estabilidad fueron: G1985, Chaucha Piña y G0077. El genotipo G2020 fue el de mayor aporte a la interacción GxA.

**Palabras claves:** interacción genotipo ambiente, antioxidante, rendimiento, estabilidad.

## Abstract

It is essential to study the genetic resource of diploid potato from plant germplasm bank (AGROSAVIA) to know the response of agronomic and nutritional variables, as well as its phenotypic stability. To 28 genotypes plus two controls in raw and cooked samples were carried out the evaluation of phenotypic stability for variables total phenols, antioxidant capacity (AOC), vitamin C, and tuber yield. The genotypes were planted in eight environments of departamento de Cundinamarca under a completely randomized block design with three repetitions, in experimental units of 51 plants. For each variable, a combined analysis of variance and, an analysis of stability and GxA interaction were carried out using the AMMI model, graphing the results in biplots. The genotype G2593 presented phenotypic stability for most of variables studied in cooked samples with higher values on general averages (AOC by ABTS 10192.89  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g DB}$ ; AOC by FRAP 272.62 mg AA/100 g DB, and total phenols 369.95 mg AEG/100 g DB). The environments of municipio de El Rosal stood out for total phenols, AOC by ABTS and by FRAP. Genotype Red Bottle had greater stability in vitamin C (15.73 raw and 7.13 cooked mg AA/100 g DB) with 56% of retention. The genotypes with the greatest stability and yield above the general average were G1989, G2590 and G2591 (18561, 19393, and 20552  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  respectively). Other outstanding genotypes with good stability were: G1985, Chaucha Piña, and G0077. The genotype G2020 was the one with the greatest contribution to GxA interaction.

**Keywords:** genotype-environment interaction, antioxidant, yield, stability.

## 3.1 Introducción

El tubérculo de la papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) es un alimento apetecido por sus características organolépticas, con beneficios nutricionales por sus contenidos de compuestos funcionales, y su potencial aprovechamiento en procesos agroindustriales (Garnica et al., 2022a). Los genotipos de papa diploide cuentan con una amplia diversidad genética y en el país se han realizado trabajos de mejoramiento dando como resultado el registro de nuevas variedades (Alzate Díaz et al., 2020; Ñustez-López y Rodríguez-Molano, 2020).

En el mejoramiento genético se estudia en ambientes diversos la capacidad de adaptación de los genotipos para conocer la interacción genotipo por ambiente (GxA) (Lagos-Burbano, 2023; Vásquez et al., 2019). El propósito es reconocer el comportamiento diferencial de los genotipos bajo diversas variables climáticas y características fisicoquímicas de los suelos (Márquez-Vasallo et al., 2020; Wissar, 1994).

En esta investigación se evaluó la estabilidad fenotípica y el rendimiento en 28 genotipos de papa diploide seleccionados mediante investigación participativa con agricultores, junto con las variedades comerciales Criolla Colombia y Criolla Guaneña. El objetivo fue identificar para las diferentes variables evaluadas (CAO por ABTS, CAO por FRAP, fenoles totales, vitamina C y rendimiento) los genotipos estables o de adaptabilidad general y de adaptación específica que fueron establecidos en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca, Colombia.

## **3.2 Metodología**

### **3.2.1 Localización**

Los genotipos evaluados se sembraron en el departamento de Cundinamarca en los municipios de Une (4°21'02,65"N, 74°03'39,71"O y 3100 msnm); Mosquera (Centro de Investigación Tibaitatá de AGROSAVIA a 4°41'37,69"N, 74°12'12,77"O y 2543 msnm); El Rosal (4°52'32,62"N, 74°15'17,61"O y 2689 msnm) y Zipaquirá (5°02'23,34"N, 74°01'55,09"O y 2950 msnm). Las pruebas en campo se realizaron de noviembre 2013 a marzo de 2014 y de abril a agosto de 2014. En las Tablas 3 y 4 se consignan las variables climáticas y las características fisicoquímicas de los suelos de cada lote de los ensayos establecidos en los cuatro municipios.

### **3.2.2 Material vegetal**

Los genotipos evaluados de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) fueron 28 seleccionados participativamente con agricultores en estudios previos que realizó el banco de germoplasma vegetal (AGROSAVIA) y dos variedades comerciales como testigo: Criolla Guaneña y Criolla Colombia (Figura 1). En la Tabla 2 se muestran las descripciones morfológicas de cada genotipo y de los testigos según los descriptores propuestos por Huamán (2008).

### 3.2.3 Diseño experimental y prácticas agronómicas

Mediante un Diseño de Bloques Completos al Azar con tres repeticiones y 30 genotipos en evaluación (incluidos los testigos) como tratamientos, se establecieron las unidades experimentales constituidas cada una de 15 m<sup>2</sup> de área con tres surcos de 5 m de largo, 1 m de distancia entre surcos y 0,30 m entre plantas, para un total de 51 plantas.

En los ocho ambientes se registraron diariamente las variables climáticas de precipitación; temperaturas mínima, media y máxima. Las mediciones se tomaron de las estaciones meteorológicas cercanas y pertenecientes al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM y de una estación particular en el municipio de Zipaquirá (ubicada a -74,01 O y 5,03 N a 2905 msnm) con un Equipo Metos 3.3 serie 8B8. Los valores promedios de las variables climáticas se presentan en la Tabla 3. Las variables climáticas mencionadas se registraron acumuladas en dos etapas: desde emergencia hasta los 60 días antes de cosecha y desde emergencia hasta la culminación del cultivo o cosecha (Tabla 3). Se registraron las variables a los 60 días basado en los estudios realizados por Valbuena et al. (2009), quienes evaluaron las escalas fenológicas de las variedades de Papa Parda Pastusa, Diacol Capiro y Criolla llamada Yema de Huevo (Criolla Colombia) en los departamentos de Boyacá, Nariño, Cundinamarca y Antioquía durante 3 ciclos de evaluación en los años 2007 a 2009; y determinaron que a los 65 días después de emergencia de la papa diploide se presenta la formación de 29 estolones y 22 tubérculos en un estado de llenado inicial a intermedio de estos.

El manejo del cultivo fue similar en los ocho ambientes. Para todos los ensayos establecidos en el estudio la dosis básica de fertilizante aplicado fue de 22 g/planta del grado 13-26-6 (94 kg N/ha, 189 kg P/ha y 44 kg K/ha); la cual, fue cercana a la dosis (21 g/planta) empleada por los agricultores para la fertilización de cultivares de papa diploide. Posteriormente, Saldaña-Villota y Cotes-Torres (2020) realizaron un análisis funcional de crecimiento en variedades de papa diploide, empleando como uno de los tratamientos de fertilización 21 g/planta, siendo la misma dosis que aplican los agricultores. Las características fisicoquímicas de los suelos para los ocho ambientes de los cuatro municipios se muestran en la Tabla 4.

### 3.2.4 Rendimiento

A la culminación del período vegetativo de los genotipos evaluados (110 a 119 días), se eliminaron plantas bordes y se cosecharon las unidades experimentales en las que se evaluó el rendimiento expresado en  $\text{kg} \cdot 15 \text{ m}^{-2}$  y luego se convirtieron a  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Los resultados correspondieron al promedio de las tres repeticiones de campo. Se escogieron los genotipos que presentaron estabilidad y adaptación específica con valores superiores o cercanos al promedio general de rendimiento.

### 3.2.5 Análisis estadístico

Los resultados de la variable rendimiento se estandarizaron a valores Z y se compilaron con las variables estandarizadas de capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C para los genotipos cultivados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca. Con el procedimiento GLM del programa SAS versión 9 (SAS Institute, 2004) se realizaron los análisis de varianza combinado para identificar la interacción genotipo por ambiente (GxA). Los tratamientos (genotipos) se compararon con la prueba de rango estudentizada de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

El modelo utilizado para el estudio de la interacción GxA y para conocer la adaptabilidad de los genotipos diploides en estudio fue el modelo con efectos principales aditivos y de interacción multiplicativos o modelo AMMI (Additive Main effects and Multiplicative Interaction) propuesto por Zobel et al. (1988) y Crossa et al. (1990) con ajustes de Vargas-Escobar et al. (2016) y García et al. (2020), según el modelo de la Tabla 20. Los resultados de AMMI se graficaron en un biplot y se colocaron en la gráfica los efectos principales y los efectos de interacción para genotipos y ambientes (Mejía-Salazar et al., 2020; Quevedo, 2018).

Para los diferentes análisis estadísticos de las variables de CAO por ABTS, CAO por FRAP, fenoles totales y vitamina C, e interpretaciones de los biplot se utilizaron las comparaciones entre ambientes y comparación de genotipos. Para los resultados de la variable rendimiento, en este capítulo se presenta el análisis de varianza combinado, la comparación de medias entre tratamientos y los respectivos análisis AMMI con las gráficas de biplot.

**Tabla 20.** Prueba estadística del modelo AMMI

Modelo	Descripción	Referencia
$Y_{ij} = \mu + g_i + e_{je} + \sum_{K=1}^n \lambda_k \alpha_{ik} Y_{jk} + R_{ij}$	$Y_{ij}$ = valor observado del i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente $\mu$ = Efecto de la media general $g_i$ = Media de j-ésimo genotipo menos la media general $e_{je}$ = Media del i-ésimo ambiente menos la media general $\lambda_k$ = Raíz cuadrada del eigenvalor del k-ésimo eje del análisis de componentes principales (ACP) <sub>k</sub> $\alpha_{ik}$ y $Y_{jk}$ = Calificaciones del ACP para el k-ésimo eje del i-ésimo genotipo y el j-ésimo ambiente, respectivamente $R_{ij}$ = residual del modelo	Zobel et al. (1988)

### 3.2.6 Identificación de genotipos relevantes

A partir de los resultados obtenidos, se consolidaron los genotipos identificados como estables (adaptación general) y de adaptación específica, con valores superiores al promedio general para cada una de las variables estudiadas: CAO por ABTS, CAO por FRAP, fenoles totales, vitamina C y rendimiento; para recomendarlos como parentales en el programa de mejoramiento genético de papa diploide de AGROSAVIA.

## 3.3 Resultados y discusión

### 3.3.1 Análisis de estabilidad fenotípica

El análisis de varianza AMMI para la capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP, fenoles totales y vitamina C, mostraron diferencias altamente significativas ( $P < 0,001$ ), en las fuentes de variación de ambiente, genotipo, interacción GxA, en muestras crudas y cocidas (Capítulo 2). La respuesta altamente significativa de la interacción GxA, justifica continuar el proceso de análisis de estabilidad fenotípica para realizar los estudios de interacción GxA en los genotipos evaluados para cada variable de estudio.

#### ▪ Capacidad antioxidante (CAO) por ABTS

En la Tabla 21 se presentan las contribuciones del ambiente, del genotipo y de la interacción GxA que explicaron el 99,39 y 99,29% ( $P < 0,001$ ) de la suma de cuadrados totales en muestras crudas y cocidas en su orden. Se encontró significancia para las tres fuentes de variación indicadas y los coeficientes de variación (CV) fueron bajos. Las evaluaciones alcanzaron altos coeficientes de determinación ( $R^2$ ). El mayor efecto se

debió al genotipo con 75,17% en muestra cruda y de 78% en muestra cocida, mientras que el efecto de la interacción GxA fue de 19,25% en muestra cruda y de 18,65% en muestra cocida. El efecto ambiental fue bajo con valores de 4,95% y 2,62% en los dos tipos de muestra, cruda y cocida respectivamente.

**Tabla 21.** Análisis de varianza AMMI para la capacidad antioxidante por ABTS de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca

Fuente de Variación	GL <sup>1</sup>	Muestra Cruda			Muestra Cocida		
		Suma Cuadrados	Cuadrado Medio	Porcentaje (%)	Suma Cuadrados	Cuadrado Medio	Porcentaje (%)
Modelo	255	1427635755	5598572***	99,39	1826808389	7163954***	99,29
Ambiente (A)	7	71101704	10157386***	4,95	48253357	6893337***	2,62
Bloque (A)	16	300392	18774ns	0,02	395671	24729 <sup>ns</sup>	0,02
Genotipo (G)	29	1079712935	37231481***	75,17	1435097026	49486104***	78,00
Interacción GxA	203	276520725	1362171***	19,25	343062336	1689962***	18,65
Error	464	8750462	18859	0,61	12970425	27954	0,71
Total	719	1436386217		100	1839778813		100
R <sup>2</sup>		0,99			0,99		
CV (%)		1,830			1,82		

Nota. <sup>1</sup>. GL: Grados de Libertad; <sup>ns</sup> no significativo, \*\*\* Diferencias altamente significativas (P≤0,001).

\*\* Diferencias altamente significativas (P≤0,01), R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación, CV = coeficiente variación.

El modelo AMMI (Tabla 22) consideró siete componentes principales (CP). En las muestras crudas los cuatro primeros CP explicaron el 89,14% de la variación (P<0,001), mientras que en las cocidas el 87,94% (P<0,001). Cabe resaltar que los CP1 y CP2 explicaron en muestras crudas el 64,24% y en muestras cocidas el 66,89% de la variación total acumulada.

**Tabla 22.** Componentes principales del modelo AMMI para la capacidad antioxidante por ABTS en muestras crudas y cocidas de 30 genotipos de papa diploide

Componentes	Grados de libertad	Muestra Cruda				Muestra Cocida			
		Variación individual (%)	Variación total acumulada (%)	Suma cuadrados	Cuadrado medio	Variación individual (%)	Variación total acumulada (%)	Suma cuadrados	Cuadrado medio
CP1	35	42,91	42,91	118664523	3390415***	47,45	47,45	162793006	4651229***
CP2	33	21,33	64,24	58994267	1787705***	19,44	66,89	66675743	2020477***
CP3	31	15,78	80,02	43590717	1406152***	13,87	80,76	47586041	1535034***
CP4	29	9,12	89,14	25222928	869756***	7,18	87,94	24619238	848939***
CP5	27	5,62	94,76	15547584	575836***	5,86	93,80	20091598	744133**
CP6	25	3,61	98,37	9978588	399144***	3,70	97,50	12693609	507744**
CP7	23	1,63	100,00	4522118	196614**	2,50	100,00	8603101	374048**

Nota: \*\* Diferencias altamente significativas (P≤0,01); \*\*\* Diferencias muy altamente significativas (P≤0,001).

Para muestras crudas y cocidas, en la Tabla 23 se presentan los promedios de CAO por ABTS y los valores de coordenadas del CP1 y del CP2. En los dos tipos de muestras (cruda y cocida) el mayor efecto del ambiente fue Rosal\_B que presentó las mayores magnitudes positivas de coordenadas en el CP1 (+72,49 y +54,08). Mientras que el mayor efecto de interacción GxA en el CP2 lo produjo Une\_B con coordenada de +33,22 para muestra cruda y en Zipaquirá\_B con coordenada de +36,25 para muestra cocida. Los efectos desfavorables de los ambientes y de la interacción sobre CAO por ABTS en muestra cruda, estuvieron dados por el ambiente Zipaquirá\_B con una coordenada de -19,56 y la interacción GxA fue dada en Tibaitatá\_B con coordenada de -34,30. Estos efectos desfavorables para muestras cocidas, estuvieron dados por el ambiente de Tibaitatá\_A con una coordenada de -30,02 y un efecto de interacción GxA en Une\_B con la coordenada -37,97 (Tabla 23 y Figura 3). Los efectos mencionados correspondieron a las condiciones de estrés debidas a las variables climáticas y a las características fisicoquímicas del suelo, en cada ambiente donde se establecieron los genotipos evaluados, que activaron en la planta los mecanismos de defensa expresados en los compuestos antioxidantes (Camacho-Escobar et al., 2020). Además, en Zipaquirá\_B la temperatura máxima estuvo por fuera de los rangos óptimos (Tabla 3) para el desarrollo de los tubérculos de papa por la sensibilidad de la planta a los cambios ambientales (Martín-Martín y Jerez-Mompie, 2017).

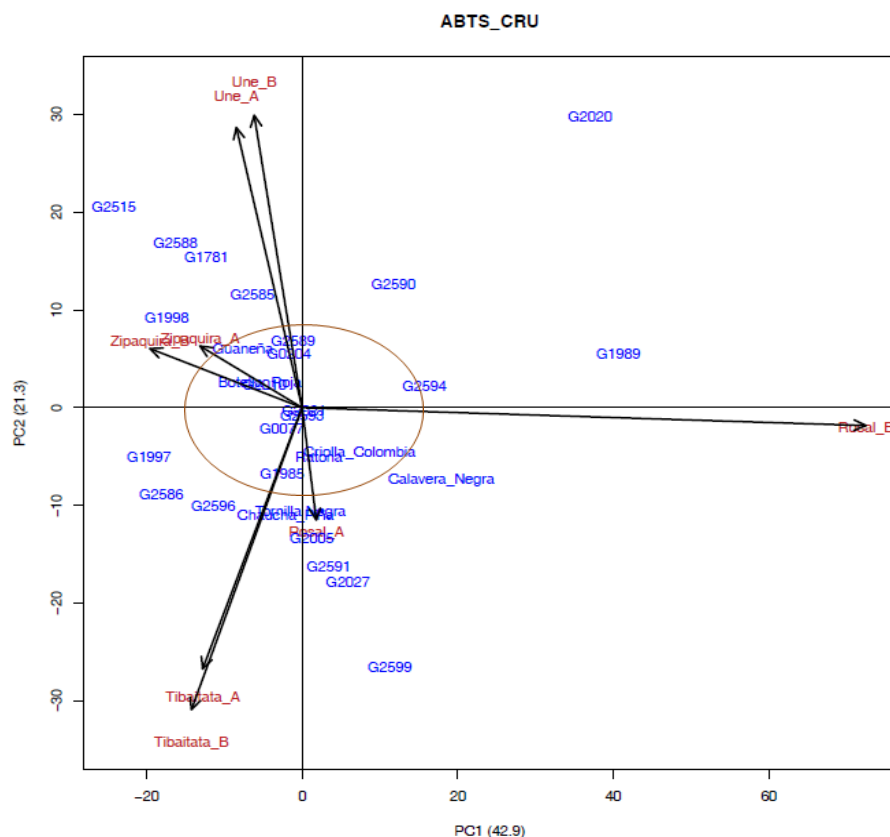
Con respecto a los genotipos, para muestra cruda en el CP1 el mayor efecto positivo del genotipo lo presentó G1989 con +40,66 y el mayor efecto desfavorable del genotipo fue por G2515 con -24,22; en el CP2, el mayor efecto de interacción estuvo dado por G2020 con +29,81 y el mayor efecto desfavorable de interacción fue en G2027 con -17,87. En las muestras cocidas, en el CP1 presentó mayor efecto el genotipo G2020 con +61,75 y el mayor efecto desfavorable fue en el genotipo G1998 con -30,37; en el CP2, el mayor efecto de interacción estuvo en G2010 con +14,17 y el mayor efecto desfavorable de interacción fue G2591 con -30,89 (Tabla 23 y Figura 3).

**Tabla 23.** Promedios de capacidad antioxidante por ABTS y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa diploide

Ambientes	Muestra cruda			Muestra cocida		
	ABTS <sup>1</sup>	CP1	CP2	ABTS <sup>1</sup>	CP1	CP2
Rosal_A	7.956,72	1,82	-12,75	9.614,32	46,55	-8,54
Rosal_B	8.023,75	72,49	-2,03	9.612,34	54,08	6,93
Tibaitatá_A	7.489,21	-12,79	-29,67	9.139,37	-30,02	-16,89
Tibaitatá_B	7.594,71	-14,23	-34,30	9.245,83	-28,91	-8,94
Une_A	7.171,17	-8,45	31,83	8.883,70	-5,19	-8,30
Une_B	7.264,51	-6,15	33,22	9.067,73	-7,54	-37,97
Zipaquirá_A	7.311,97	-13,13	7,01	8.973,82	-18,62	37,46
Zipaquirá_B	7.308,44	-19,56	6,71	9.058,60	-10,35	36,25
<b>Genotipos</b>						
Botella Roja	7.742,05	-5,47	2,41	9.497,91	-4,06	5,98
Calavera Negra	8.697,44	17,86	-7,39	10.143,46	6,37	-0,61
Chauca Piña	9.220,19	-2,13	-11,02	11.266,22	-3,19	-5,47
Criolla Colombia	5.609,04	7,36	-4,57	7.875,97	-10,32	8,93
G0077	8.144,80	-2,64	-2,16	10.554,85	11,50	13,75
G0204	8.967,42	-1,69	5,54	10.663,62	-7,51	12,67
G1781	7.962,44	-12,30	15,34	9.930,97	-7,93	3,99
G1985	9.155,12	-2,57	-6,73	11.164,36	-14,07	-6,21
G1989	6.207,43	40,66	5,56	8.031,06	17,72	1,15
G1997	8.437,56	-19,69	-5,03	9.962,43	-2,69	8,46
G1998	5.481,20	-17,44	9,16	6.777,42	-30,37	8,60
G2005	8.308,28	1,20	-13,41	10.573,48	0,56	-22,29
G2010	8.636,66	-4,87	2,35	10.645,33	-19,89	14,17
G2020	9.405,94	36,99	29,81	11.067,49	61,75	-5,07
G2021	6.910,87	0,24	-0,35	8.524,06	-5,58	11,86
G2027	8.601,92	5,88	-17,87	10.215,93	0,44	5,63
G2515	6.172,08	-24,22	20,56	7.828,33	5,72	-1,18
G2585	6.296,36	-6,41	11,62	7.552,16	-18,99	-29,50
G2586	6.122,11	-18,11	-8,88	7.359,81	5,01	8,92
G2588	7.064,67	-16,31	16,88	8.719,65	12,71	-3,38
G2589	6.816,28	-1,17	6,81	7.773,63	6,15	-3,08
G2590	6.400,44	11,71	12,62	7.532,12	8,20	-0,89
G2591	6.854,79	3,40	-16,26	8.108,33	-1,23	-30,89
G2593	8.194,36	-0,03	-0,84	10.192,89	4,33	0,44
G2594	5.955,39	15,71	2,21	7.848,48	14,10	9,50
G2596	7.069,31	-11,45	-10,10	8.261,61	-5,28	-4,55
G2599	8.085,64	11,25	-26,58	9.579,20	-0,68	20,43
Criolla Guaneña	5.702,03	-7,65	6,02	6.940,02	-16,08	0,39
Ratona	8.155,78	2,16	-4,99	10.627,36	-8,09	-25,54
Tornilla Negra	9.299,17	-0,25	10,72	10.765,71	1,39	3,79

Nota. <sup>1</sup> μmol de Trolox/100 g BS

Con respecto a las muestras crudas, en la Figura 3 se exhibe la representación gráfica de la interacción GxA para la variable de CAO por ABTS, con la contribución a la interacción tanto de los genotipos evaluados como de los ambientes. También se puede identificar los genotipos con estabilidad fenotípica y de adaptación específica para la variable.



**Figura 3.** Biplot del análisis AMMI para capacidad antioxidante por ABTS de muestras crudas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Los genotipos G2021, G2593, G0077, G2589, G0204, G2010, G1985, Botella Roja, más los testigos Criolla Colombia y Criolla Guaneña, fueron los de mayor estabilidad (cercanos al punto de origen) con adaptación general. Estos no contribuyeron a la interacción GxA (Figura 3). De todos ellos, los genotipos G2589, G2021, Criolla Colombia y Criolla Guaneña presentaron valores promedio por debajo de la media general de la CAO por ABTS ( $7522,56 \mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ ) con un rango entre  $5609,04$  y  $6910,87 \mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  (Tablas 7, 10 y 23). Los genotipos G0204, G2593, G0077, G2010, Botella Roja y Tornilla Negra expresaron mayor valor de la CAO por ABTS que el promedio general con un rango entre  $7742,05$  y  $9299,17 \mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  (Tablas 7, 10 y 23). Los genotipos G0077 y Botella Roja de carne morada y roja fueron estables para CAO por ABTS. En un estudio similar realizado por Tierno-Fernández (2017) en 21 genotipos de papa de carne morada y roja, determinó CAO por ABTS entre  $0,00223$ - $0,0279 \text{ mol TE (equivalente Trolox)}/\text{kg de}$

muestra fresca (223-2790  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g}$  de muestra fresca) e identificó cuatro genotipos estables en el diagrama biplot y el ambiente con mayor contribución con la interacción GxA estuvo en CON2015.

Los genotipos G2515, G2020, G2599, G2586 y G1997 fueron los de mayor contribución a la interacción GxA en esta variable, debido a su ubicación distante del punto de origen. Los genotipos G2020, G1997 y G2599 presentaron promedios superiores al promedio general (7522,56  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ ) para CAO por ABTS con un rango entre 8085,64 y 9405,94  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ . Diversos estudios corroboran que existe un efecto del ambiente sobre la respuesta de genotipos de papa a la CAO por ABTS (Samaniego et al., 2020; Zhang et al., 2022). Los genotipos G2515 y G2586 presentaron promedio inferior a la media general con 6172,07 y 6122,11  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  respectivamente (Tablas 10 y 23).

La mayor respuesta para la variable en mención se presentó en el ambiente de Rosal\_B con 8023,75  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  (Tablas 9 y 23). Diferente respuesta se observó entre los dos ambientes del municipio de El Rosal, con vectores casi perpendiculares (Figura 3), debido a que los ambientes presentaron diferencias principalmente en la precipitación. En el primer ambiente Rosal\_A, se tuvo estrés hídrico por saturación sobrepasando la óptima precipitación para este cultivo (900 mm/ciclo) (Porras y Herrera, 2015). En contraste, el segundo ambiente (Rosal\_B) tuvo estrés por sequía debido a la baja precipitación (397,4 mm a 60 días antes de cosecha y 637,8 mm a ciclo de cultivo) (Tabla 3) en la fase inicial de desarrollo y crecimiento de las plantas. Según lo observado en la Figura 3, los genotipos Tornilla Negra, Chaucha Piña y G2005 mostraron adaptación específica al ambiente del Rosal\_A, y sus valores medios de CAO por ABTS fueron superiores al promedio general (7522,56  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ ), es decir, la respuesta de la variable CAO por ABTS en estos genotipos (Tablas 10 y 23) fue buena bajo el exceso de precipitación en el ciclo de cultivo (Tabla 3). Cerón et al. (2022) mencionan que, en la fase vegetativa de genotipos de papa diploide, la necesidad de precipitación está entre 500 a 700 mm/ciclo, sin embargo, en el ambiente de Rosal\_A que presentó estrés hídrico por saturación y el ambiente de Rosal\_B con estrés hídrico por sequía, indujeron a la planta a activar los mecanismos de defensa y, por ello, a aumentar la

respuesta de la actividad antioxidante. Gabriel et al. (2013) sostienen que el cultivo de papa es altamente sensible a la sequía y su efecto incide en la productividad y depende de la etapa fenológica que se presente.

Los vectores del biplot (Figura 3) son la representación gráfica de la respuesta de los ambientes. En los ambientes de los municipios de Zipaquirá y Une se observan los vectores en la misma dirección con ángulos agudos, lo cual implica correlación entre las respuestas para la variable de los dos ambientes de cada municipio. Los experimentos en ambos municipios estaban a una altitud superior a los 2900 msnm, por lo tanto, no se presentaron variaciones marcadas en las temperaturas medias, mínimas y máximas durante el ciclo de cultivo (Tabla 3). Estas variables inciden en el desarrollo y formación de los tubérculos, al igual que en la concentración de los compuestos antioxidantes como lo refieren Zhang et al. (2022). En los dos ambientes del municipio de Mosquera (Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B) se mostraron vectores traslapados o de similar condición ambiental para la respuesta de los genotipos Tornilla Negra y Chaucha Piña.

Al analizar las cotas de los ambientes de los municipios de Une y Zipaquirá que se observan en la Tabla 3, se deduce que tuvieron similitud (3180 y 2950 msnm respectivamente). De igual manera, ocurrió con las altitudes de los ambientes de los municipios de Mosquera (Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B) y El Rosal (2545 y 2680 msnm respectivamente). Lizarazo-Peña et al. (2022) afirman que a mayor altitud se incrementan los días del ciclo vegetativo. Los ambientes de los municipios de Zipaquirá y Une no fueron favorables para la mayor expresión de CAO por ABTS, puesto que se obtuvieron resultados inferiores al promedio general de 7522,56  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ . En ambientes con menor altitud como los municipios de Mosquera y El Rosal, la respuesta de la variable CAO por ABTS en los genotipos fue superior al promedio general (Tablas 7 y 9).

Diversos estudios confirman que la papa es una fuente potencial y natural de antioxidantes para el consumo humano. Reddivari et al. (2007) estudiaron la influencia del genotipo, la localidad y el año sobre la actividad antioxidante, fenoles y carotenoides totales en 25 genotipos de papa de color, que se evaluaron en dos años (2003 y 2004) en dos regiones de Texas. Encontraron que los efectos genotípicos fueron significativos para todos los parámetros medidos, siendo mayores que los efectos de localidad y año; lo que demuestra



muestras cocidas superiores al promedio general (9199,46  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{ g BS}$ ) (Tabla 7) con un rango entre 9497,91 a 11266,22  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{ g BS}$  (Tablas 10 y 23). Los genotipos G2596, G2515, G2589 y G2590 también ostentaron alta estabilidad, pero con valores inferiores al promedio general (Tabla 7), con un rango entre 7532,12 a 8261,65  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{ g BS}$  (Tablas 10 y 23). La mayor expresión de la variable CAO por ABTS estuvo en G2593 y Calavera Negra con valores de 10192,89 y 10143,46  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  (Tabla 10).

Los genotipos que más aportaron a la interacción GxA fueron G2020, G2005, Ratona, G1998, G2585 y G2591 con un rango de 6777,42 a 11067,49  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  (Tabla 23). Los genotipos G2020, G2005 y Ratona superaron el promedio general (Tabla 7), cuyo rango estuvo entre 10573,48 a 11067,49  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ , para la CAO por ABTS en muestras cocidas. El genotipo G2020 presentó adaptación específica al ambiente Rosal\_A. En estudios realizados por Márquez-Vasallo et al. (2020) sobre la interacción GxA en cultivares de papa identificaron genotipos estables y de adaptación específica para seleccionar genotipos avanzados.

En esta variable la respuesta en los dos ambientes de cada uno de los cuatro municipios presentó estrecha relación (Figura 4), es decir, similar respuesta de los genotipos en la expresión de CAO por ABTS en muestras cocidas. Un ejemplo, es lo observado en el municipio de El Rosal (Rosal\_B y Rosal\_A) con valores de 9612,3 y 9614,3  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ . Así mismo, ocurrió en los ambientes A y B de los otros municipios (Tabla 23). El genotipo G1989 mostró adaptación específica en el ambiente Rosal\_B y el genotipo G2588 en el ambiente Rosal\_A; mientras que el genotipo G2020 compartió adaptación específica para los dos ambientes de Rosal\_A y Rosal\_B (Figura 4).

En los ambientes similares de Zipaquirá\_A y Zipaquirá\_B (8973,82 y 9058,60  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ , respectivamente) (Tabla 23), los genotipos G0204, G1997 y G2599, presentaron adaptación específica con valores superiores al promedio general (Tabla 7), entre 9579,20 y 10663,62  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ . Los genotipos G2021 y Criolla Colombia (testigo), mostraron promedios inferiores al general con valores de 8524,06 y 7875,97  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  en su orden (Tabla 23).

En los ambientes del municipio de Mosquera, Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B, con promedios

respectivos de 9139,4 y 9245,8  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  (Tabla 23), se observó una adaptación específica del genotipo G1985 (Figura 4) que presentó el segundo promedio de CAO por ABTS con 11164,36  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$  (Tabla 23). Para el ambiente de Une\_B los genotipos Ratona, G2005, G2585 y G2591 exhibieron adaptación específica. Ratona y G2005 ostentaron para esta variable un promedio superior al promedio general (9199,46  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ ), mientras que el genotipo G2591 alcanzó un promedio de 8108,33  $\mu\text{mol Trolox}/100\text{g BS}$ , inferior al promedio general (Tablas 10 y 23).

Las variaciones de las respuestas para la variable de CAO por ABTS en muestras crudas y cocidas de genotipos de papa diploide, se debió al efecto del genotipo y al efecto de la interacción. Por lo cual, el incremento en la respuesta de la variable de muestra cruda a cocida es visible, independiente del manejo de los genotipos, bajo condiciones climáticas y características fisicoquímicas de suelos diversas. Algunos estudios han encontrado estas diferenciaciones en los genotipos de carne de colores negruzco, rojo y amarillo, como los estudios de Grudzińska et al. (2016) y de Ševčík et al. (2009), quienes reportaron diferentes y mayores valores de actividad antioxidantes en genotipos sometidos a varios métodos de cocción, tales como: cocido en ebullición, cocido al vapor, calentado u horneado en microondas y frito.

El genotipo sobresaliente que se recomiendan para su futuro uso en programas de mejoramientos es Chaucha Piña, que obtuvo mayor respuesta de CAO por ABTS en muestras cruda y cocida con valores superiores al promedio general. El genotipo G2593 fue estable y sobresalió por la mayor expresión de esta variable. El ambiente de menor aporte a la interacción GxA fue el de Une\_A.

### ▪ Capacidad antioxidante (CAO) por FRAP

En la Tabla 24 se presentan los resultados para las fuentes de variación por ambiente, genotipo e interacción GxA, en muestras crudas y cocidas, con diferencias altamente significativas para la CAO por FRAP ( $P < 0,0001$ ). El modelo en muestras crudas aportó en conjunto el 96,02% y en muestras cocidas el 97,96% de la variación en la suma de cuadrados totales. En ambos tipos de muestras hubo mayor incidencia del genotipo y de la interacción GxA.

**Tabla 24.** Análisis de varianza AMMI de la capacidad antioxidante por FRAP de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca

Fuente de Variación	GL <sup>1</sup>	Muestra Cruda			Muestra Cocida		
		Suma Cuadrados	Cuadrado Medio	Porcentaje (%)	Suma Cuadrados	Cuadrado Medio	Porcentaje (%)
Modelo	255	459693,93	1802,72***	96,17	1743379,87	6836,78***	98,06
Ambiente (A)	7	54214,47	7744,92***	11,34	44866,12	6409,46***	2,52
Bloque/(A)	16	715,37	44,71 <sup>ns</sup>	0,15	1735,31	108,46 <sup>ns</sup>	0,10
Genotipo (G)	29	232587,83	8020,27***	48,66	1009895,12	34823,97***	56,80
Interacción GxA	203	172176,27	848,16***	36,02	686883,25	3383,66***	38,64
Error	464	18280,68	39,39	3,83	34468,82	74,29	1,94
Total	719	477974,61		100	1777848,69		100
R <sup>2</sup>		0,960			0,980		
CV (%)		6,750			4,370		

Nota. 1. GL: Grados de Libertad; ns no significativo; \*\*\* Diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,0001$ ), R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación, CV = coeficiente variación.

El modelo AMMI (Tabla 25) muestra para los tres primeros componentes principales (CP1, CP2 y CP3) diferencias altamente significativas ( $P < 0,0001$ ), a partir del efecto de la interacción y contribuyeron a la variación acumulada en muestras crudas con 80,56% y, en muestras cocidas, con 81,24%. Para los CP1 y CP2 la variación explicada de la interacción GxA fue del 69,00% y del 64,61% en muestras crudas y cocidas, respectivamente.

**Tabla 25.** Componentes principales del modelo AMMI para la capacidad antioxidante por FRAP en muestras crudas y cocidas de 30 genotipos de papa diploide

Componentes	Grados de libertad	Muestra Cruda				Muestra Cocida			
		Suma de cuadrados	Variación individual (%)	Variación total acumulada (%)	Cuadrado medio	Suma de cuadrados	Variación individual (%)	Variación total acumulada (%)	Cuadrado medio
CP1	35	77776,66	45,17	45,17	2222,19***	305749,15	44,51	44,51	8735,70***
CP2	33	41031,68	23,83	69,00	1243,38***	134688,93	19,61	64,61	4081,48***
CP3	31	19902,70	11,56	80,56	642,02***	117585,94	17,12	81,24	3793,10***
CP4	29	12777,33	7,42	87,98	440,60***	54417,89	7,92	89,16	1876,48***
CP5	27	11519,03	6,70	94,68	426,63***	35694,93	5,20	94,36	1322,03***
CP6	25	5772,63	3,35	98,03	230,90***	25015,13	3,64	98,00	1000,61***
CP7	23	3396,24	1,97	100,00	147,66***	13731,28	2,00	100,00	597,01***

Nota: \*\*\* Diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,001$ ).

En la Tabla 26 se presentan los promedios de CAO por FRAP para muestras crudas y cocidas, más los valores propios de CP1 y CP2. Para muestra cruda en el CP1 el mayor

efecto positivo se presentó en el ambiente Rosal\_B (+6,85), mientras que, el ambiente más desfavorable fue Tibaitatá\_B (-7,81); en el CP2, el mayor efecto positivo se obtuvo en Rosal\_A (+5,54) y lo opuesto en Zipaquirá\_A (-4,32). Para muestra cocida, en el CP1 el mayor efecto positivo lo mostró Rosal\_A (+9,28) y el ambiente con efecto más desfavorable lo presentó Une\_A (-9,37); en el CP2, el mayor efecto positivo estuvo en Tibaitatá\_A (+8,95) y el mayor efecto desfavorable se observó en Zipaquirá\_A (-5,92) (Tabla 26).

En el ambiente de Rosal\_A se presentó estrés por saturación desde la fase de llenado de tubérculos y en el ambiente de Rosal\_B se dio estrés por sequía en la primera fase de desarrollo del cultivo, condiciones climáticas que alteraron el normal desarrollo de las plantas y con ello indujo a la formación de componentes antioxidantes en los tubérculos como mecanismo de defensa, lo cual reportan André et al. (2009), que las variaciones debidas a los ambientes y a los genotipos observadas en cultivares andinos de papa afectan la expresión de compuestos fitoquímicos en dichos cultivares. Además, sostienen que el efecto del genotipo debe ser más destacado que del medio ambiente para llevar las variedades a su uso en los programas de mejoramiento.

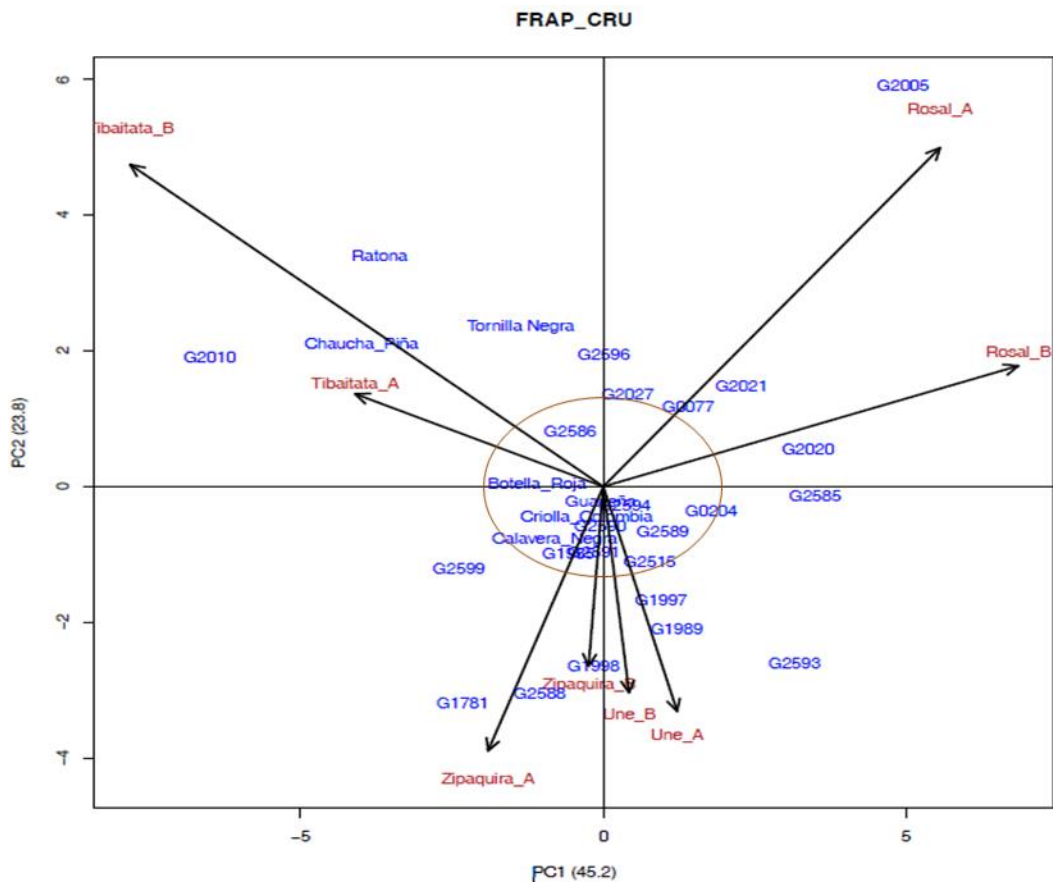
También se observa en la Tabla 26 la respuesta de la CAO por FRAP en muestra cruda. En el CP1 el mayor efecto del genotipo lo mostró G2005 (+4,94) y el efecto más desfavorable se obtuvo en G2010 (-6,50); en el CP2 se destacó con mayor efecto el genotipo G2005 (+5,91) mientras que el efecto más desfavorable estuvo en G1781 (-3,18). Para muestra cocida, en el CP1 el mayor efecto del genotipo lo compartieron G2005 y G2594 (+5,63 y +5,96), y el efecto del genotipo más desfavorable estuvo en G2588 (-6,24); en el CP2, el mayor efecto se observó en Chaucha Piña (+5,35) y el efecto más desfavorable lo compartieron G0204 (-3,63) y G2585 (-3,64).

**Tabla 26.** Promedios de capacidad antioxidante por FRAP y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa diploide

Ambientes	Muestra cruda			Muestra cocida		
	FRAP <sup>1</sup>	CP1	CP2	FRAP <sup>1</sup>	CP1	CP2
Rosal_A	105,16	5,56	5,54	205,66	9,28	-4,04
Rosal_B	105,58	6,85	1,97	208,75	7,10	-3,35
Tibaitatá_A	92,26	-4,1	1,52	196,16	2,22	8,95
Tibaitatá_B	99,37	-7,81	5,27	201,49	3,90	6,96
Une_A	87,62	1,22	-3,68	196,74	-9,37	0,07
Une_B	81,68	0,42	-3,37	195,40	-7,67	1,69
Zipaquirá_A	86,39	-1,90	-4,32	183,42	-2,15	-5,92
Zipaquirá_B	85,62	0,24	-2,93	188,20	-3,28	-4,21
<b>Genotipos</b>						
Botella Roja	81,80	-1,10	0,03	175,45	0,03	3,51
Calavera Negra	87,21	-0,80	-0,79	158,35	1,39	0,87
Chaucha Piña	119,13	-3,99	2,09	237,30	-3,33	5,35
Criolla Colombia	81,13	-0,28	-0,46	143,55	-1,64	-1,17
G0077	96,92	1,40	1,17	224,90	-4,10	-1,21
G0204	106,53	1,77	-0,36	210,72	2,42	-3,63
G1781	90,02	-2,32	-3,18	193,53	-7,17	-2,54
G1985	94,54	-0,58	-0,99	222,18	-2,46	4,92
G1989	84,03	1,21	-2,09	169,73	-1,04	-1,35
G1997	94,77	0,95	-1,68	262,70	-3,42	1,51
G1998	71,83	-0,16	-2,64	172,36	-1,16	-1,84
G2005	104,12	4,94	5,91	200,88	5,63	-2,59
G2010	111,84	-6,50	1,91	234,64	3,86	1,99
G2020	163,61	3,37	0,54	280,30	2,41	-1,78
G2021	102,72	2,28	1,47	215,97	5,79	3,80
G2027	89,94	0,39	1,36	179,15	-1,10	0,71
G2515	78,71	0,76	-1,10	140,37	0,35	-3,37
G2585	88,58	3,49	-0,13	172,28	-0,08	-3,64
G2586	75,93	-0,55	0,81	166,17	-1,07	-1,81
G2588	91,19	-1,05	-3,05	198,45	-6,24	2,70
G2589	72,73	0,98	-0,66	168,02	-0,67	1,58
G2590	82,75	-0,05	-0,59	168,63	1,16	0,69
G2591	74,35	-0,15	-0,96	163,37	0,42	-0,90
G2593	99,72	3,15	-2,60	272,62	-0,20	0,26
G2594	77,14	0,35	-0,27	181,47	5,96	-2,40
G2596	80,34	0,003	1,95	167,50	-0,35	-1,62
G2599	99,48	-2,38	-1,21	255,68	-2,50	-0,53
Criolla Guaneña	78,44	-0,04	-0,23	161,45	-0,08	-2,48
Ratona	108,84	-3,69	3,40	199,82	1,15	3,78
Tornilla Negra	100,46	-1,37	2,34	211,81	6,03	4,34

Nota. <sup>1</sup> (mg AA/100 g BS)

En el biplot de la Figura 5 se observa la representación gráfica de la contribución de los genotipos de papa diploide evaluados y los ambientes para la CAO por FRAP en muestras crudas.



**Figura 5.** Biplot del análisis AMMI para capacidad antioxidante por FRAP de muestras crudas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Los genotipos Botella Roja, G2594, Calavera Negra, G2590, G1985, G2591, G2589, G2515, G0204 y G2586, más los testigos Criolla Guaneña y Criolla Colombia, se situaron cerca al punto de origen evidenciando estabilidad y adaptación general en esta variable (Figura 5). Los genotipos G1985 y G0204 presentaron valores de CAO por FRAP en muestra cruda superiores al promedio general (92,96 AEAC /100 g BS) (Tabla 7) con valores de 94,54 y 106,53 AEAC /100 g BS (Tabla 26). Los genotipos G2589, G2590, G2591, G2586, G2594, Criolla Guaneña, Criolla Colombia, Botella Roja y Calavera Negra obtuvieron valores de la variable inferiores al promedio general en un rango de 72,73 a 87,21 AEAC /100 g BS (Tabla 26).

Los genotipos G2010, G2005 y G2593 contribuyeron a la interacción GxA con valores superiores al promedio general, teniendo en cuenta que G2010 mostró una cuantificación sobresaliente en ambientes desfavorables de 111,84 AEAC /100 g BS (Tabla 26). Los genotipos G0077, G2021 y G2020 mostraron adaptación específica, los dos primeros con el ambiente Rosal\_A y el último con el ambiente Rosal\_B; los cuales superaron el promedio general (92,96 AEAC /100 g BS) con valores en su orden de 96,92; 102,72 y 163,61 AEAC /100 g BS (Tabla 26).

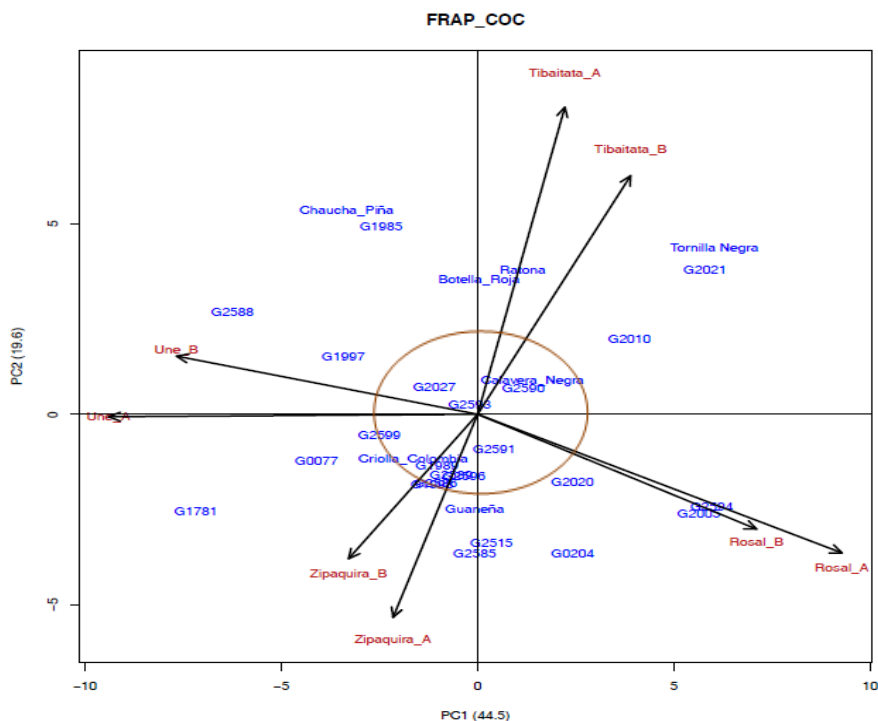
Los genotipos Tornilla Negra y Ratona exhibieron adaptación específica al ambiente de Tibaitatá\_B. El genotipo Chaucha Piña compartió adaptación específica en los ambientes del municipio de Mosquera (Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B), con valores promedios superiores al promedio general (92,96 AEAC /100 g BS) (Tabla 7) en un rango de 100,46 a 119,13 AEAC /100 g BS (Tabla 26). Los genotipos G1781 y G2588 mostraron adaptación específica y desfavorable con el ambiente de Zipaquirá\_A, con valores de CAO por FRAP en muestra cruda de 90,02 y 91,19 AEAC /100 g BS, en su orden (Tabla 26) e inferiores al promedio general. El presente estudio está en consonancia con el realizado por Scavo et al. (2023), quienes evaluaron seis cultivares en ocho ambientes para determinar el efecto de interacción en la expresión de CAO por FRAP y otras variables, hallando a través de análisis AMMI los genotipos estables con variables evaluadas superiores al promedio.

El genotipo G1998 presentó una adaptación específica en los ambientes de Zipaquirá\_B y Une\_B (Figura 5), pero con pobre respuesta debido a que la CAO por FRAP estuvo por debajo del promedio general con 71,83 AEAC /100 g BS (Tabla 7). La respuesta del genotipo G1997 en muestra cruda fue superior al promedio general con 94,77 AEAC /100 g BS, aunque el ambiente Une\_A presentó baja precipitación (Tabla 3); sin embargo, esta precipitación estuvo dada durante todo el ciclo del cultivo. Lo contrario sucedió con G1989 en el ambiente de Une\_A con menor respuesta para la variable (84,03 AEAC /100 g BS).

En la Figura 5, los vectores de los ambientes en los cuatro municipios exhibieron la misma dirección formando ángulos agudos entre sí, debido a la correlación entre los ambientes de cada uno de los municipios. La menor correlación se observó entre los ambientes de los municipios de Mosquera (Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B) y de El Rosal (Rosal\_A y Rosal\_B).

Las magnitudes de los vectores en los ambientes Rosal\_A, Rosal\_B y Tibaitatá\_B, indican alto aporte de estos ambientes a la interacción GxA. El ambiente de Rosal\_A produjo el mayor valor de la CAO por FRAP de 105,16 AEAC /100 g BS (Tabla 26). Las magnitudes de coordenadas negativas se obtuvieron en los ambientes de Zipaquirá\_A y Une\_A con valores de -4,32 y -3,67 respectivamente (Tabla 26). En este contexto, diferentes estudios realizados en cultivares de papa demostraron que la CAO por FRAP depende de los genotipos y de las condiciones de los ambientes donde se establecieron, como lo reportaron Bahadori et al. (2023) y Franková et al. (2022).

La Figura 6 corresponde al biplot de la contribución de los genotipos de papa diploide, de los ambientes y de la interacción GxA para la variable CAO por FRAP en muestras cocidas.



**Figura 6.** Biplot del análisis AMMI para capacidad antioxidante por FRAP de muestras cocidas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Los genotipos G2593, G2027, G2596, G2591, G2589, G2586, G2590, G1989, G1998, Calavera Negra y Criolla Colombia, se ubican cercanos al punto de origen (Figura 6), de ahí que mostraron alta estabilidad y adaptabilidad general en los ambientes evaluados. El

genotipo G2593 se ubicó muy próximo al origen y reportó una CAO por FRAP de 272,62 AEAC /100 g BS (Tabla 26), superior al promedio general (196,98 AEAC /100 g BS) (Tablas 7). Para los demás genotipos estables y cercanos al punto de origen sus valores de CAO por FRAP fueron inferiores al promedio general en un rango de 143,55 a 179,15 AEAC /100 g BS (Tabla 26).

Los genotipos que mayor aporte realizaron a la interacción GxA en esta variable fueron: G1781, Tornilla Negra, G2021, G1985, Chaucha Piña y G0204. Solo el genotipo G1781 presentó cuantificación menor de 193,53 AEAC /100 g BS (Tabla 10) con respecto al promedio general de CAO por FRAP en muestra cocida (196,98 AEAC /100 g BS) (Tabla 7). Los ambientes de mayor contribución a la interacción GxA fueron Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B, Rosa\_A y Une\_A (Figura 6), con valores de 196,16; 201,49; 205,66 y 196,74 AEAC /100 g BS, respectivamente. Similares estudios se han desarrollado para determinar la interacción GxA en papa y su cuantificación en la CAO por FRAP, como el realizado por Pinhero et al. (2016), quienes determinaron la interacción GxA para 14 genotipos, como un factor que afecta la composición de compuestos bioactivos como la CAO por FRAP en papa cruda y cocida.

Los genotipos G2588, G0077, G1997 y G2599 presentaron adaptación específica a los ambientes de Une\_A y Une\_B, sobrepasando el valor de la media general de 196,98 AEAC /100 g BS (Tabla 9). Los ambientes del municipio de Zipaquirá mostraron condiciones desfavorables para CAO por FRAP en muestra cocida, principalmente para los genotipos G1998 y G2586 con valores de 172,36 y 166,17 AEAC /100 g BS respectivamente, siendo inferiores estos valores al promedio general (Tablas 7 y 10).

En los ambientes del municipio de El Rosal los genotipos G2020, G2005 y G2594 mostraron adaptación específica, los dos primeros registraron valores superiores al promedio general con 280,3 y 200,88 AEAC /100 g BS, en su orden, en tanto que G2594 cuantificó un valor inferior al promedio de 181,47 AEAC /100 g BS (Tabla 10). El genotipo Ratona presentó adaptación específica en los ambientes del municipio de Mosquera (Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B) con 199,82 AEAC /100 g BS, valor superior al promedio general para CAO por FRAP (Tablas 7 y 10). El genotipo Botella Roja con

adaptación específica para el ambiente de Tibaitatá\_A obtuvo un valor inferior al promedio general con 175,45 AEAC /100 g BS (Tablas 26).

En la Figura 6, se pueden apreciar los vectores de los ocho ambientes, los cuales se ubican en la misma dirección para cada municipio formando ángulos agudos entre ellos. Esto evidencia la estrecha correlación entre los ambientes (Frutos-Bernal, 2011) (Tabla 3).

Los genotipos que ostentaron estabilidad para la CAO por FRAP en muestras crudas y cocidas, fueron Calavera Negra, G2590, G2586 y G2591; sin embargo, obtuvieron una cuantificación inferior al promedio general. Los ambientes donde se obtuvo mayor respuesta a la variable fueron los del municipio de El Rosal.

### ▪ Fenoles totales

El análisis de varianza AMMI presenta las contribuciones del ambiente, genotipo e interacción GxA. El modelo en las muestras crudas explicó el 97,69% y en muestras cocidas el 97,71% ( $P < 0,0001$ ) de la suma de cuadrados totales, dentro de los cuales fue más alto el factor genotipo con 62,59% (muestra cruda) y 77,31% (muestra cocida) (Tabla 27).

**Tabla 27.** Análisis de varianza AMMI para fenoles totales de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca

Fuente de Variación	GL <sup>1</sup>	Muestra Cruda			Muestra Cocida		
		Suma Cuadrados	Cuadrado Medio	Porcentaje (%)	Suma Cuadrados	Cuadrado Medio	Porcentaje (%)
Modelo	255	1952932,97	7658,56***	97,83	2864358,38	11232,78***	97,79
Ambiente (A)	7	134166,45	19166,64***	6,72	46758,71	6679,82***	1,6
Bloque (A)	16	2852,67	178,29*	0,14	2203,93	137,75ns	0,08
Genotipo (G)	29	1249353,68	43081,16***	62,59	2264564,11	78088,42***	77,31
Interacción GxA	203	566560,16	2790,94***	28,38	550831,64	2713,46***	18,80
Error	464	42988,96	92,65	2,17	64824,02	139,71	2,21
Total	719	1995921,93		100	2929182,41		100
R <sup>2</sup>		0,97			0,97		
CV (%)		4,23			3,63		

Nota. 1. GL: Grados de Libertad; ns: no significativo. \* Diferencias significativas ( $P \leq 0,05$ ). \*\*\* Diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,0001$ ), R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación, CV = coeficiente variación.

De acuerdo con la Tabla 28, los cuatro primeros CP aportaron a la variación de la interacción en muestras crudas el 88,73% ( $P < 0,0001$ ) y en muestras cocidas el 85,97% ( $P < 0,0001$ ). Los CP1 y CP2 explicaron el 66,35% en muestras crudas y el 60,30% en muestras cocidas de la interacción GxA.

**Tabla 28.** Componentes principales del modelo AMMI para fenoles totales en muestras crudas y cocidas de 30 genotipos de papa diploide

Componentes	Grados de libertad	Muestra Cruda				Muestra Cocida			
		Suma de cuadrados	Variación individual (%)	Variación total acumulada (%)	Cuadrado medio	Suma de cuadrados	Variación individual (%)	Variación total acumulada (%)	Cuadrado medio
CP1	35	204350,4	36,07	36,07	5838,58***	198306,92	36,00	36,00	5665,91***
CP2	33	171577,2	30,28	66,35	5199,31***	133841,48	24,30	60,30	4055,80***
CP3	31	80226,9	14,16	80,51	2587,96***	87303,52	15,85	76,15	2816,24***
CP4	29	46549	8,22	88,73	1605,14***	50228,82	9,12	85,97	1732,03***
CP5	27	26460,9	4,67	93,40	980,03**	37918,51	6,88	92,15	1404,39***
CP6	25	20134,4	3,55	96,95	805,37*	32856,32	5,97	98,12	1314,25***
CP7	23	17261,5	3,05	100,00	750,50 <sup>ns</sup>	10376,08	1,88	100,00	451,13***

Nota. \* Diferencias significativas ( $P \leq 0,05$ ); \*\* Diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,01$ ); \*\*\* Diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,001$ ); <sup>ns</sup> no significativas

En la Tabla 29 se muestra para la variable fenoles totales los promedios y las coordenadas de los CP1 y CP2. En muestra cruda, en el CP1 el mayor efecto del ambiente fue en el Rosal\_B (+13,09) y el mayor efecto desfavorable del ambiente lo obtuvo Tibaitatá\_A (-8,04); en el CP2 el mayor efecto de la interacción GxA estuvo dada por Une\_B (+6,19) y Zipaquirá\_A (+6,53) y el efecto de interacción GxA más desfavorable lo presentó Tibaitatá\_A (-7,58). En muestra cocida, para el CP1 igualmente fue el ambiente Rosal\_B con mayor efecto del ambiente con +12,88 y el efecto más desfavorable lo obtuvo Zipaquirá\_B (-5,88); en el CP2, el mayor efecto de la interacción GxA lo mostró Tibaitatá\_A (+7,39) y lo opuesto fue para Une\_A (-8,35).

En la mayoría de los ambientes hubo baja precipitación acumulada durante el ciclo de cultivo, la que estuvo distribuida mayormente a los 60 días antes de cosecha. En el ambiente Rosal\_B la precipitación baja inició a los 35 días después de emergencia, que condujo a la alteración en el desarrollo de la planta, la formación de estolones y tubérculos, así como el llenado de estos. El ambiente Rosal\_A tuvo mayor precipitación y la distribución de lluvia venía sucediéndose adecuadamente durante el período vegetativo, pero a los 82 días después de emergencia ocurrió una alta precipitación que

ocasionó la saturación de las parcelas, realizando drenajes en las mismas para eliminar el exceso de agua, más sin embargo se alteró el llenado de los tubérculos y su calidad. El ambiente de Une\_B presentó una precipitación y distribución óptima durante el ciclo de cultivo. Otra desventaja del ambiente de Rosal\_B, fue la textura limosa que condujo a baja aireación y a alta compactación del suelo con desventaja para el crecimiento del sistema radicular y de los estolones. Todo lo anterior condujo a un desequilibrio de las plantas, activando los mecanismos de defensa y con ello la formación de compuestos bioactivos como los fenoles totales. En este sentido, Méndez-Espinoza y Vallejo-Reina (2019) confirmaron que las plantas bajo estreses abióticos tienen impacto negativo para la productividad y por ello, las plantas responden con diversos mecanismos frente a las condiciones desfavorables del entorno.

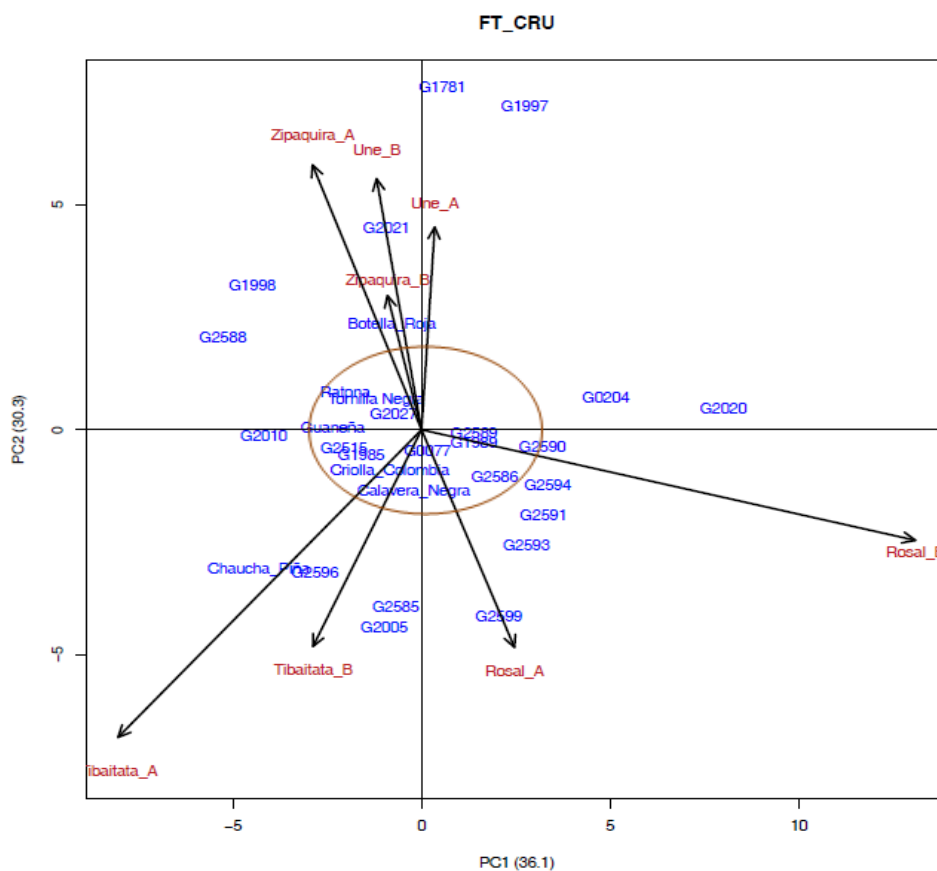
**Tabla 29.** Promedios de fenoles totales y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa diploide

Ambientes	Muestra cruda			Muestra cocida		
	Fenoles totales <sup>1</sup>	CP1	CP2	Fenoles totales <sup>1</sup>	CP1	CP2
Rosal_A	244,54	2,46	-5,37	334,02	3,01	5,62
Rosal_B	254,65	13,09	-2,73	340,33	12,88	-4,04
Tibaitatá_A	224,51	-8,04	-7,58	322,12	2,00	7,39
Tibaitatá_B	221,90	-2,87	-5,34	326,38	-1,31	1,39
Une_A	211,35	0,35	4,99	316,10	-3,46	-8,35
Une_B	222,60	-1,19	6,19	324,33	-2,24	-4,87
Zipaquirá_A	220,71	-2,89	6,53	314,32	-4,98	-0,70
Zipaquirá_B	217,87	-0,90	3,31	324,89	-5,88	3,58
<b>Genotipos</b>						
Botella Roja	168,57	-0,79	2,32	280,74	-0,18	-1,11
Calavera Negra	245,14	-0,21	-1,37	362,21	-0,61	0,51
Chaucha Piña	287,03	-4,32	-3,10	397,43	-0,30	1,43
Criolla Colombia	190,60	-0,85	-0,90	240,95	0,92	-0,88
G0077	286,81	0,15	-0,45	400,76	-1,52	-0,07
G0204	275,60	4,88	0,72	389,64	2,64	-1,66
G1781	239,46	0,54	7,61	353,11	-1,76	-2,27
G1985	250,21	-1,60	-0,56	370,77	-3,61	0,50
G1989	206,68	1,38	-0,29	281,14	4,37	-0,16
G1997	233,55	2,73	7,17	356,83	-0,86	-2,78
G1998	194,21	-4,49	3,19	325,16	-5,32	-3,20
G2005	203,50	-1,00	-4,38	340,09	5,27	-1,95
G2010	263,30	-4,18	-0,12	354,72	-3,37	1,58
G2020	298,12	7,99	0,46	402,41	5,97	-5,36
G2021	257,25	-0,93	4,49	358,17	-1,48	-3,54
G2027	266,29	-0,74	0,34	367,46	-0,70	-0,43
G2515	182,18	-2,06	-0,40	255,95	-2,20	1,39
G2585	195,21	-0,69	-3,94	283,48	5,10	8,75
G2586	182,38	1,93	-1,04	248,57	0,26	-2,32
G2588	254,78	-5,27	2,06	351,66	-4,86	2,18
G2589	176,84	1,38	-0,07	254,75	1,10	1,80
G2590	185,23	3,20	-0,37	252,46	2,44	1,01
G2591	201,13	3,23	-1,88	267,05	2,00	1,37
G2593	280,62	2,77	-2,56	369,95	0,79	0,74
G2594	184,87	3,33	-1,22	257,30	2,30	1,55
G2596	165,99	-2,83	-3,16	262,33	-0,06	-0,30
G2599	263,62	2,04	-4,13	381,79	2,23	-2,23
Criolla Guaneña	167,55	-2,36	0,06	239,70	-1,53	5,31
Ratona	266,49	-1,21	0,66	381,35	-2,87	-0,88
Tornilla Negra	244,80	-1,21	0,66	371,40	-4,17	1,03

Nota. <sup>1</sup> (EAG/100 g BS)

En la Tabla 29 para fenoles totales en muestra cruda, en el CP1 se observa que el mayor efecto de genotipo lo presentó G2020 (+7,99) y el efecto más desfavorable se obtuvo en G2588 (-5,27); en el CP2 el mayor efecto lo compartieron los genotipos G1781 (+7,61) y G1997 (+7,17) mientras que, más desfavorable fue para los genotipos G2005 (-4,38) y G2599 (-4,13). Para muestra cocida, en el CP1 el mayor efecto del genotipo lo presentaron G2005, G2020 y G2585 (+5,27; +5,97y +5,10 en su orden), y el efecto del genotipo más desfavorable lo ostentó G1998 (-5,32); en el CP2, con mayor efecto fue G2585 (+8,75) y el más desfavorable lo mostró G2020 (-5,36).

El biplot de la Figura 7 representa las contribuciones de los genotipos de papa diploide evaluados en ocho ambientes para la variable de fenoles totales en muestras crudas.



**Figura 7.** Biplot del análisis AMMI para fenoles totales de muestras crudas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Los genotipos para muestras crudas que se ubicaron cerca al punto de origen, como Ratona, Tornilla Negra, G2027, G2515, G1985, G0077, G2589, G1989, G2586 y Calavera Negra, junto a las variedades comerciales Criolla Guaneña y Criolla Colombia, mostraron estabilidad y, por lo tanto, adaptabilidad en los ambientes evaluados. En orden decreciente sobresalieron los genotipos G0077, Ratona, G2027, G1985, Calavera Negra y Tornilla Negra con fenoles totales entre 244,80 y 286,81 EAG/100 g BS, valores superiores al promedio general de la variable (227,27 EAG/100 g BS) (Tablas 7, 11 y 29). En este grupo de genotipos estables se destaca la presencia de tubérculos con piel de color rojo y morado. Los genotipos G0077, Calavera Negra, G1989 y G1985 no disminuyeron la actividad de fenoles totales, así estuvieran en ambientes desfavorables. Similares estudios realizados por Ru et al. (2019) y Akyol et al. (2016) en cultivares de papa de diversos colores, encontraron relación del contenido de fenoles totales con la CAO y con las diversas pigmentaciones de los tubérculos.

Los genotipos G2588, G1998, G1781 y G1997 presentaron alto aporte sobre la interacción GxA. Sobresalió el genotipo G2588 con 254,78 EAG/100 g BS, superior al promedio general de 227,27 EAG/100 g BS (Tablas 7 y 11). El genotipo G1998 obtuvo el valor más bajo para fenoles totales con 194,21 EAG/100 g BS. Los ambientes de Rosal\_B y Tibaitatá\_A fueron los que aportaron en mayor grado a la interacción GxA. Según el estudio de Vázquez-Carrillo et al. (2016), cuando se presenta interacción GxA el contenido de fenoles totales en tubérculos de papa fue afectado por altitud y temperatura, entre otros.

En el ambiente Rosal\_B se presentó adaptación específica para los genotipos G2590, G2594, G0204 y G2020 (Tabla 29). G2020 presentó mayor respuesta a la variable con 298,12 EAG/100 g BS (Tabla 11). Este ambiente, presentó una precipitación baja para el cultivo de papa (Tabla 3) que favoreció en determinados genotipos como G2020 la acumulación de fenoles totales, así mismo, lo expresan Vázquez-Carrillo et al. (2016) en su estudio, sobre las condiciones de estrés hídrico en la respuesta de fenoles totales. En los ambientes de Zipaquirá\_A, Zipaquirá\_B, Une\_A y Une\_B, se observó alta correlación entre ellos y la respuesta de la variable fue similar, a la vez, los genotipos G2021 y Botella Roja, con promedios de 257,25 y 168,57 EAG/100 g BS, en su orden (Tabla 11) presentaron adaptación específica a ellos. Los ambientes

evaluados de los municipios de Mosquera, Une y Zipaquirá presentaron para la variable los menores valores e inferiores al promedio general (Tablas 9 y 29). Algunos genotipos como Chaucha Piña y G2596 mostraron proximidad entre sí, entre los ambientes Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B (Figura 7).

En el biplot de la Figura 7 se observan ángulos agudos entre los ambientes del mismo municipio, lo que demuestra correlación entre las respuestas de la variable y, por lo tanto, similitud entre los ambientes. Zipaquirá\_A y Une\_B presentaron las coordenadas positivas de mayor valor (+6,53 y +6,19 respectivamente), y fueron favorables para la respuesta en fenoles totales dependiendo también del genotipo. Las menores magnitudes de las coordenadas la presentaron los ambientes Tibaitatá\_A (-7,58) y Tibaitatá\_B (-5,34) junto con el ambiente de Rosal\_A (-5,37) (Tabla 29). Estudios realizados por André et al. (2009) sobre la influencia del ambiente y del genotipo en compuestos de polifenoles, demostraron que las correlaciones y las variaciones entre ambientes de una localidad influyen en la variable de fenoles totales, como sucedió en la presente investigación.

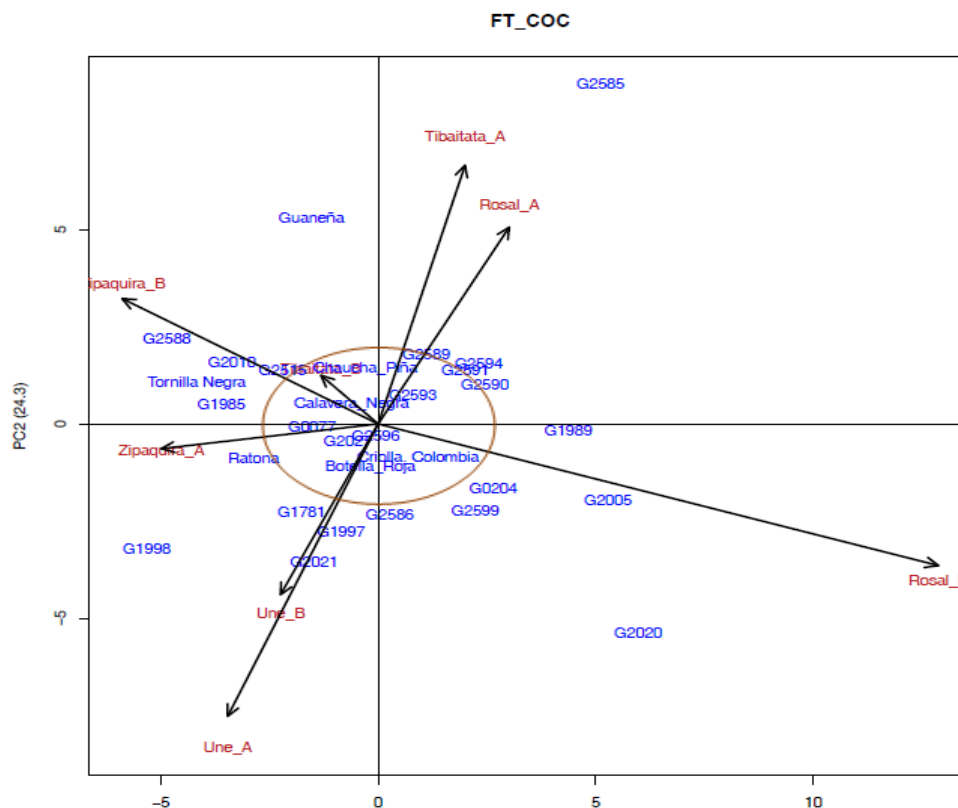
Los ambientes de evaluación estuvieron ubicados a diferentes altitudes (entre 2543 a 3100 msnm), lo que condujo a la variación de la respuesta para fenoles totales en los genotipos evaluados. Bellumori et al. (2020) y Hamouz et al. (2006) reportan que, a mayor altitud mayor contenido de fenoles totales en cultivos de papa. Pero en este estudio sucedió lo contrario, en los ambientes de los municipios de Zipaquirá (2950 msnm) y Une (3100 msnm), la respuesta de fenoles totales fue inferior al promedio general (227,27 mg EAG/100 g BS) (Tablas 3, 7 y 11), siendo afectado principalmente por la variable climática de precipitación.

En muestras cocidas para fenoles totales (Figura 8), los genotipos estables y de adaptabilidad general cercanos al punto de origen fueron G0077, Chaucha Piña, G2593, G2027, Calavera Negra, Botella Roja, G2596, G2589, G2591, G2590, G2515 y la variedad Criolla Colombia. Los primeros cinco genotipos de piel violeta obtuvieron una respuesta alta para el contenido de fenoles totales en muestras cocidas en un rango de 362,21 a 400,76 mg EAG/100 g BS (Tabla 29), con valores superiores al promedio general de 325,31 mg EAG/100 g BS (Tabla 7). Su tasa de retención del compuesto estuvo en un rango entre 1,26 para Criolla Colombia y 1,67 para Botella

Roja (Tabla 11). En los genotipos de piel color amarillo G2596 y Criolla Colombia, los fenoles totales oscilaron entre 240,95 y 262,33 mg EAG/100 g BS, rango inferior al promedio general. Bellumori et al. (2020) afirman que los tubérculos de papa con coloración roja y morado de piel y carne, presentan más contenido de fenoles totales que los tubérculos de carne blanca o amarilla. Otros estudios como el realizado por Pinhero et al. (2016), quienes evaluaron 14 cultivares de papa pigmentada, encontraron mayor efecto de interacción GxA para la composición fitoquímica que incluye los fenoles totales; también, corroboraron mayor contenido de fenoles totales en tubérculos cocidos y pigmentados.

Los genotipos que más contribuyeron a la interacción GxA fueron G2020, G2585 y G1998, con piel de color rojo, amarillo y rojo en su orden (Figura 1), su tasa de aumento fue alta después de la cocción y estuvo entre 1,35 y 1,67 (Tabla 11). Aunque estos genotipos no tienen asociación con los ambientes donde fueron establecidos. Los genotipos G2020 y G1998 exhibieron valores superiores al promedio general de 325,31 mg EAG/100 g BS (Tabla 7). El genotipo G2020 con 402,41 mg EAG/100 g BS y una tasa de retención de 1,35 sobresalió por su alta respuesta para fenoles totales con respecto a los demás genotipos evaluados (Tabla 11). El ambiente Rosal\_B mostró el mayor aporte a la interacción GxA con la magnitud de coordenadas en el eje de interacción más alta; fue un ambiente que presentó estrés por sequía afectando la respuesta con aumento del contenido de fenoles totales. Zarzecka et al. (2019) evaluaron el contenido de polifenoles en tubérculos de tres cultivares a los que les aplicaron herbicidas para el control de malezas y bioestimulantes para el crecimiento de las plantas, encontrando mayor cantidad de polifenoles en el 2014 cuando hubo una condición de precipitación acumulada de 335,1 mm durante el ciclo del cultivo.

Los ambientes desfavorables de Une\_A y Une\_B mostraron condiciones similares entre sí, con adaptación específica para los genotipos G2021, G1997, G1781 y G2586; cuyas tasas de retención luego de la cocción estuvieron entre 1,36 a 1,53. En los tres primeros la respuesta a la variable fue superior al promedio general, en su orden 358,17; 356,83 y 353,11 mg EAG/100 g BS, lo contrario sucedió para G2586 (248,57 mg EAG/100 g BS) (Tabla 11).



**Figura 8.** Biplot del análisis AMMI para fenoles totales de muestras cocidas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

En los ambientes de Zipaquirá\_A y Zipaquirá\_B compartieron adaptación específica los genotipos Tornilla Negra y G1985, los cuales expresaron valores de fenoles totales superiores al promedio general con 371,4 y 370,77 mg EAG/100 g BS y tasas de retención de 1,52 y 1,48, en su orden (Tabla 11). Solo mostraron adaptación específica en el ambiente de Zipaquirá\_B, los genotipos G2010, G2588 y G2515, de los cuales, los dos primeros obtuvieron valores de fenoles totales en muestras cocidas superiores al promedio general con 354,72 y 351,66 mg EAG/100 g BS y tasa de retención de 1,35 y 1,38 (Tabla 11). El ambiente de Zipaquirá\_A no favoreció la respuesta para fenoles totales en el genotipo G2515 que presentó un valor inferior a la media general de 255,95 mg EAG/100 g BS y tasa de retención de 1,40 (Tabla 11).

En los ambientes de Tibaitatá\_A y Rosal\_A el genotipo G2589 presentó adaptación específica con valor de 254,75 mg EAG/100 g BS inferior al promedio general de 325,31 mg EAG/100 g BS (Tabla 7) y tasa de aumento de 1,44 (Tabla 11). Los genotipos G2594, G2591 y G2590 con valores inferiores al promedio general en la variable estudiada y tasas de retención de 1,39; 1,33 y 1,36 en su orden (Tabla 11), los cuales presentaron adaptación específica al ambiente Rosal\_A. En muestras cocidas, los genotipos G0204, G2005, G1989 y G2599 obtuvieron valores de fenoles totales de 389,64; 340,09; 281,14 y 252,46 mg EAG/100 g BS (Tabla 11) respectivamente, y mostraron adaptación específica en el ambiente de Rosal\_B. Estos resultados demuestran la diversidad de respuesta de la variable en los genotipos y el efecto de la interacción GxA.

En la Figura 8 se observa que dada la magnitud del vector para el ambiente de Rosal\_B, su aporte a la interacción fue mayor. En este ambiente la respuesta de la variable fenoles totales fue superior al promedio general con un valor de 340,3 mg EAG/100 g BS (Tablas 7, 11 y 29). El genotipo de mayor respuesta para fenoles totales, lo obtuvo G2020 en los dos tipos de muestras, con valores superiores al promedio general. Los genotipos estables en la variable fueron G2027, Calavera Negra y G0077.

### ▪ **Vitamina C**

En la Tabla 30 se observa el análisis de varianza AMMI para la variable vitamina C, en el cual el ambiente, el genotipo y la interacción GxA fueron significativas y la suma de los tres aportaron a la varianza el 69,06% en muestras crudas y el 73,46% en muestras cocidas ( $P < 0,0001$ ). La interacción GxA contribuyó a la varianza con el 50,46% ( $P < 0,0001$ ) en muestras crudas y el 41,11% ( $P < 0,0001$ ) en muestras cocidas, y fue la que más aportó a la suma de cuadrados total.

**Tabla 30.** Análisis de varianza AMMI para vitamina C de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca

Fuente de Variación	GL <sup>1</sup>	Muestra Cruda			Muestra Cocida		
		Suma Cuadrados	Cuadrado Medio	Porcentaje (%)	Suma Cuadrados	Cuadrado Medio	Porcentaje (%)
Modelo	255	1495,44	5,87***	70,87	783,86	3,07***	75,02
Ambiente (A)	7	72,37	10,34**	3,42	136,90	19,56***	13,10
Bloque (A)	16	37,94	2,37 <sup>ns</sup>	1,80	16,27	1,02 <sup>ns</sup>	1,56
Genotipo (G)	29	320,39	11,05***	15,18	201,11	6,94***	19,25
Interacción GxA	203	1064,75	5,25***	50,46	429,58	2,12***	41,11
Error	464	614,59	1,33	29,13	261,06	0,56	24,98
Total	719	2110,03		100	1044,92		100,0
R <sup>2</sup>		0,71			0,75		
CV (%)		7,52			10,14		

Nota. <sup>1</sup>GL Grados de Libertad. <sup>ns</sup> no significativo. \* Diferencias significativas (P≤0,05). \*\* Diferencias altamente significativas (P≤0,002). \*\*\* Diferencias altamente significativas (p≤0,0001), R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación, CV = coeficiente variación.

En la Tabla 31 se observan que los cuatro primeros CP contribuyeron a la variación tanto en muestras crudas como cocidas. En muestras crudas su aporte fue del 78,23% y en muestras cocidas de 85,05% (P<0,0001) con diferencias altamente significativas. En los CP1 y CP2 la variación acumulada para la interacción fue de 50,57% en muestra cruda y de 50,32% en muestra cocida.

En la Tabla 32 se muestran los promedios de vitamina C para muestras crudas y cocidas, junto a las coordenadas de los CP1 y CP2. En muestra cruda en el CP1, el mayor efecto del ambiente lo obtuvo Zipaquirá\_B (+1,51) y el efecto más desfavorable fue en Tibaitatá\_B (-1,80); en el CP2 el mayor efecto favorable lo presentó Tibaitatá\_A (+1,44) y lo opuesto fue para Rosal\_B (-1,69). En muestras cocidas, en el CP1 el mayor efecto del ambiente lo consiguió Une\_B (+1,25) y el efecto más desfavorable del ambiente lo ostentó Rosal\_A (-1,43); en el CP2, el mayor efecto lo exhibió el ambiente Rosal\_B (+1,42) y el efecto más desfavorable estuvo en Zipaquirá\_A (-1,45).

**Tabla 31.** Componentes principales del modelo AMMI para vitamina C en muestras crudas y cocidas de 30 genotipos de papa diploide

Componentes	Grados de libertad	Muestra Cruda				Muestra Cocida			
		Suma de cuadrados	Variación individual (%)	Variación total acumulada (%)	Cuadrado medio	Suma de cuadrados	Variación individual (%)	Variación total acumulada (%)	Cuadrado medio
CP1	35	340,57	31,99	31,99	9,73***	118,53	27,66	27,66	3,38***
CP2	33	197,86	18,58	50,57	5,99***	97,11	22,66	50,32	2,94***
CP3	31	174,76	16,41	66,98	5,64***	87,62	20,44	70,76	2,83***
CP4	29	119,78	11,25	78,23	4,13***	61,23	14,29	85,05	2,11***
CP5	27	106	9,96	88,19	3,93***	38,04	8,88	93,93	1,41**
CP6	25	73,81	6,93	95,12	2,95**	15,55	3,63	97,56	0,66 <sup>ns</sup>
CP7	23	51,96	4,88	100,00	2,26*	10,49	2,44	100,00	0,46 <sup>ns</sup>

Nota. \* Diferencias significativas ( $P \leq 0,05$ ); \*\* Diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,01$ ); \*\*\* Diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,001$ ).

En muestras crudas, los ambientes Zipaquirá\_A, Zipaquirá\_B, Une\_A y Une\_B mostraron condiciones favorables para vitamina C resaltando la variable climática grados días acumulados a 60 días antes de cosecha con contribución positiva. No obstante, la respuesta de la variable vitamina C en los ambientes del municipio de Zipaquirá fue menor debido a que las características fisicoquímicas del suelo como Al intercambiable, P disponible y acidez presentaron valores altos en los análisis de los suelos (Tabla 3), siendo negativa la contribución de estas características para vitamina C. Igualmente sucedió para los ambientes del municipio de Une, donde el P disponible fue alto y su contribución a la variable fue negativa. Estudios realizados por Rivadeneira et al. (2016) para la determinación del efecto de la interacción GxA sobre los contenidos de Fe, Zn y vitamina C en papa, que fueron afectados por el genotipo, el ambiente y la interacción GxA, sobresalieron los efectos asociados al contenido de materia orgánica, a la fertilidad del suelo y a los contenidos de P y K; siendo el P uno de los elementos esenciales en la nutrición pero, el desequilibrio en la fertilización con alto contenido de P tiene desventaja con la disminución del contenido de vitamina C en el tubérculo de papa. En el estudio de Xing et al. (2020) sobre la correlación entre los nutrientes del suelo y la calidad de la papa en China, reportaron la contribución negativa del P disponible en el contenido de vitamina C, como ocurrió con los resultados del presente estudio.

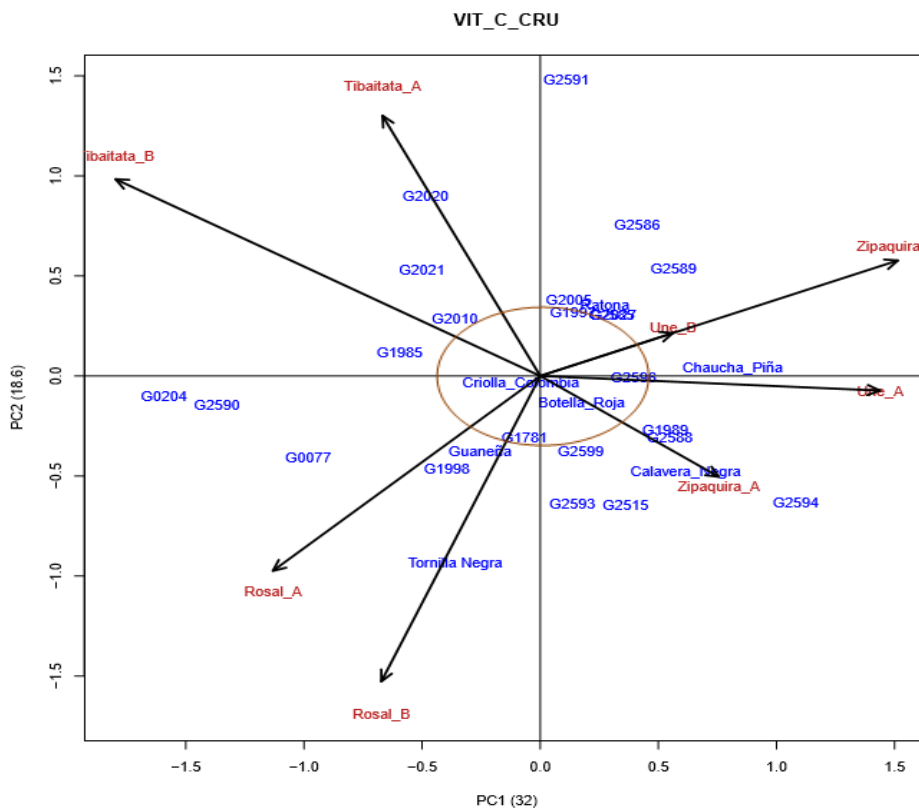
**Tabla 32.** Promedios de vitamina C y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa diploide

Ambientes	Muestra cruda			Muestra cocida		
	Vitamina C <sup>1</sup>	CP1	CP2	Vitamina C <sup>1</sup>	CP1	CP2
Rosal_A	15,65	-1,13	-1,08	7,53	-1,43	-0,97
Rosal_B	15,73	-0,67	-1,69	7,34	-0,76	1,42
Tibaitatá_A	15,38	-0,67	1,44	7,99	-0,73	0,65
Tibaitatá_B	15,14	-1,80	1,09	7,89	-0,01	-0,16
Une_A	15,31	1,44	-0,08	6,86	1,18	0,26
Une_B	15,50	0,56	0,24	6,61	1,25	0,30
Zipaquirá_A	14,79	0,75	-0,56	7,49	0,35	-1,45
Zipaquirá_B	14,90	1,51	0,64	7,47	0,14	-0,05
<b>Genotipos</b>						
Botella Roja	15,73	0,17	-0,14	7,13	0,04	0,15
Calavera Negra	14,98	0,61	-0,48	6,76	0,69	0,15
Chaucha Piña	15,35	0,81	0,03	7,01	0,42	-0,06
Criolla Colombia	16,21	-0,08	-0,04	7,09	0,43	-0,64
G0077	15,76	-0,98	-0,41	7,05	-0,004	-0,64
G0204	15,51	-1,59	-0,10	7,78	-0,27	-0,64
G1781	14,75	-0,07	-0,31	7,47	0,58	-0,03
G1985	15,74	-0,59	0,11	7,79	-0,07	0,99
G1989	14,90	0,53	-0,27	7,75	-0,75	0,30
G1997	14,33	0,14	0,32	7,15	0,35	-0,18
G1998	15,21	-0,39	-0,47	8,38	-0,84	0,03
G2005	15,65	0,12	0,38	7,61	-0,09	0,21
G2010	15,46	-0,36	0,29	8,63	-0,54	-0,20
G2020	16,50	-0,48	0,90	7,57	-0,26	0,58
G2021	15,25	-0,50	0,53	7,49	0,42	0,12
G2027	15,18	0,31	0,30	7,68	0,91	0,51
G2515	14,96	0,36	-0,65	5,91	0,60	0,19
G2585	14,50	0,30	0,30	8,02	-0,67	0,6
G2586	14,65	0,41	0,76	7,79	0,38	0,26
G2588	15,58	0,55	-0,31	7,91	-0,80	0,69
G2589	14,90	0,56	0,54	6,81	0,33	-0,09
G2590	14,14	-1,37	-0,15	7,13	0,17	0,66
G2591	15,85	0,11	1,48	7,19	-0,17	-0,97
G2593	14,88	0,13	-0,64	7,30	0,09	-0,26
G2594	15,96	1,08	-0,63	7,72	-0,20	-0,18
G2596	13,89	0,39	-0,01	6,98	-0,02	0,01
G2599	15,06	0,17	-0,38	6,78	0,14	-0,39
Criolla Guaneña	16,59	-0,25	-0,38	7,64	-0,50	-0,08
Ratona	15,76	0,27	0,36	6,96	0,01	-0,19
Tornilla Negra	14,76	-0,36	-0,94	7,40	-0,40	-0,03

Nota. <sup>1</sup> mg de AA /100 g BS

En muestra cruda, en el CP1 el genotipo que presentó mayor efecto fue G2594 (+1,08) y el efecto de genotipo más desfavorable se observó en G0204 (-1,59); en el CP2 el mayor efecto lo presentó G2591 (+1,48) mientras que, el efecto más desfavorable fue observado en Tornilla Negra (-0,94). Para muestra cocida, en el CP1 el mayor efecto del genotipo lo mostró G2027 (+0,91), y el efecto del genotipo más desfavorable lo compartieron los genotipos G1998 (-0,84) y G2588 (-0,80); en el CP2, el mayor efecto lo presentó el G1985 (+0,99) y el efecto más desfavorable lo reveló G2591 (-0,97).

En el biplot del modelo AMMI (Figura 9) se muestra la contribución de los genotipos evaluados, los ambientes y la interacción GxA para la variable vitamina C en muestra cruda.



**Figura 9.** Biplot del análisis AMMI para vitamina C de muestras crudas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

El genotipo Botella Roja y la variedad Criolla Colombia presentaron estabilidad y, por lo tanto, adaptabilidad general a los ambientes evaluados, cuyos contenidos de vitamina C fueron de 15,73 y 16,21 mg AA /100g BS en su orden, valores superiores al promedio general de 15,30 mg AA /100g BS (Tablas 7 y 32). Los genotipos con mayor contribución a la interacción GxA la presentaron: G2594, G2591 y G0204 con valores de 15,96; 15,85 y 15,51 mg AA/100g BS, superiores al promedio general (Tablas 7 y 32). El genotipo G2590 con alta contribución a GxA presentó 14,40 mg AA/100g BS de vitamina C, valor inferior al promedio general.

Con respecto a los ambientes de evaluación, los vectores de mayor magnitud y, por lo tanto, de mayor aporte a la interacción GxA se observaron en los ambientes Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B, Zipaquirá\_B y Rosal\_B. En Tibaitatá\_A se observó la mayor respuesta para vitamina C con 15,38 mg AA/100g BS, por encima del promedio general (Tablas 9 y 32), muy cerca de Tibaitatá\_B (15,14 mg AA/100g BS). Aunque los ambientes de Rosal\_A y Rosal\_B fueron desfavorables, en ellos, se logró la máxima respuesta de vitamina C en muestra cruda con 15,65 y 15,70 mg AA/100g BS en su orden, superior al promedio general.

Los ambientes de Zipaquirá\_A (14,79 mg AA/100g BS) y Zipaquirá\_B (14,90 mg AA/100g BS) no fueron favorables para la respuesta de vitamina C, puesto que los genotipos presentaron valores por debajo del promedio general (Tablas 9 y 32). Los ambientes de Une\_A (15,31 mg AA/100g BS) y Une\_B (15,50 mg AA/100g BS) presentaron valores superiores al promedio general (Tablas 9 y 32). Rivadeneira et al. (2016) realizaron un estudio sobre el efecto de la interacción de GxA con cuatro ambientes y cuatro genotipos, reportando que la concentración de vitamina C fue altamente afectada por el genotipo, el ambiente y su interacción.

Los genotipos Ratona, G2005, G1997, G2027 y G2585 compartieron adaptación específica en los ambientes de Une\_B y Zipaquirá\_B, con valores superiores en Ratona y G2005 de 15,76 y 15,65 mg AA/100g BS, en su orden. Los demás genotipos presentaron una respuesta de vitamina C inferior al promedio general (15,30 mg AA/100g BS). Los genotipos G2599, G2515, G1989 y Calavera Negra exhibieron adaptación específica en el ambiente de Zipaquirá\_A (Figura 9), la respuesta de esta variable tuvo valores

inferiores al promedio general; mientras que el genotipo G2588 presentó adaptación específica superior a la media general con 15,58 mg AA/100g BS (Tabla 32).

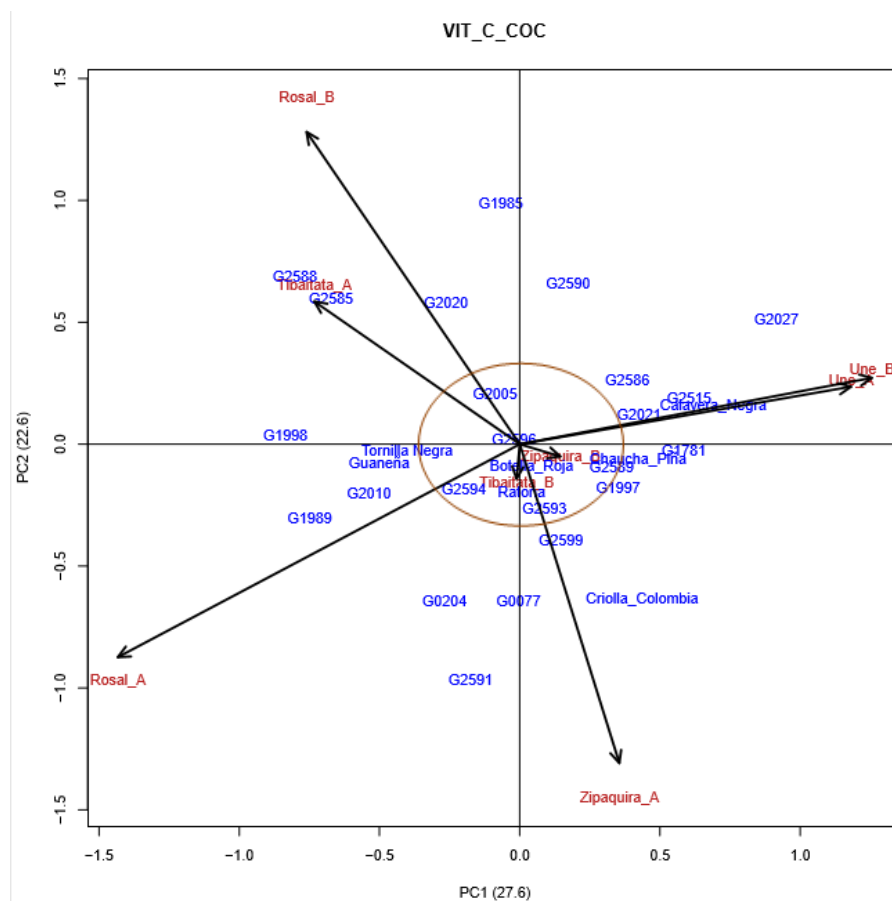
El genotipo Chaucha Piña mostró adaptación específica en el ambiente de Une\_A y obtuvo un valor cercano al promedio general de 15,35 mg AA/100g BS. Los genotipos G2021 y G2010 compartieron adaptación específica en los ambientes del municipio de Mosquera (Tibaitatá\_A y Tibaitatá\_B), solo G2010 sobrepasó al promedio general con 15,46 mg AA/100g BS. Hamouz et al. (2018) y Hrabovská et al. (2013), encontraron que el contenido de vitamina C en los tubérculos es influenciado principalmente por el genotipo; no obstante, en el presente estudio el mayor efecto para la vitamina C en muestras crudas se presentó en la interacción GxA.

La representación gráfica del biplot (Figura 9), expone para cada uno de los ambientes dentro de los municipios, vectores con ángulos agudos, lo que implica correlación entre ellos para la respuesta de la variable, es decir, fueron similares. Los ambientes de los municipios de Une y Zipaquirá presentaron correlación entre ellos, aunque de diferente magnitud (Figura 9). El genotipo G2020 ostentó adaptación específica en el ambiente de Tibaitatá\_A favoreciendo la respuesta de la vitamina C. Los ambientes de Rosal\_A y Rosal\_B también presentaron correlación, y aunque fueron ambientes de condiciones desfavorables, la respuesta de la variable vitamina C en los genotipos sobrepasó al promedio general (Tabla 32).

En el biplot de la Figura 10 se muestra la representación gráfica de la contribución de los genotipos de papa diploide, los ambientes y la interacción para la variable de vitamina C en muestras cocidas.

Los genotipos que presentaron estabilidad y adaptación general por su contenido de vitamina C en muestras cocidas, fueron Ratona, G2596, Botella Roja, G2593, G2594, G2589, Chaucha Piña, G1997 y G2005, cuyo rango estuvo entre 6,81 y 7,72 mg AA/100g BS, y repuntó G2005 y G2594 con 7,61 y 7,72 mg AA/100g BS, sobre el promedio general de 7,40 mg de AA /100 g BS (Tablas 7, 12 y 32). Las retenciones de vitamina C luego de la cocción estuvieron desde 44% a 50% (Tabla 12), sobresaliendo G2596 y G1997 con 50% de retención para ambos genotipos. Después del proceso de cocción se

perdió un porcentaje de vitamina C por su característica termolábil, lo que también es reportado por Jiménez et al. (2015).



**Figura 10.** Biplot del análisis AMMI para vitamina C de muestras cocidas de 30 genotipos de papa diploide evaluadas en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

El genotipo G2010 obtuvo la máxima expresión de la variable con 8,63 mg AA/100g BS y 56% de retención; seguido de G1989, Criolla Guaneña y Tornilla Negra con 7,75; 7,64 y 7,4 mg AA/100g BS (retenciones de 52%, 46% y 50% en su orden) (Tabla 12).

El genotipo que más contribuyó a la interacción GxA fue G2027 (7,68 mg AA/100g BS y retención de 51%) y sobrepasó la respuesta de la variable al promedio general de 7,40 mg AA/100g BS. Los ambientes de Zipaquirá\_A y Rosal\_B, fueron los que más contribuyeron a la interacción GxA y sus coordenadas mostraron mayores valores de magnitud con -1,45 y +1,42, respectivamente, con contenidos de vitamina C superiores al

promedio general de 7,5 y 7,4 mg AA/100g BS (Tabla 32). El ambiente de mayor efecto de interacción negativo fue Rosal\_A.

Los ambientes de Zipaquirá\_B y Tibaitatá\_B no contribuyeron a la interacción GxA. Los genotipos establecidos en estos dos ambientes expresaron mayor respuesta de la concentración de vitamina C por encima del promedio general con valores de 7,5 y 7,9 en su orden (Tabla 9).

En la Figura 10 se observa que los ambientes Une\_A y Une\_B, fueron muy correlacionados y, por lo tanto, similares entre sí para esta variable. Los genotipos G2586, G2021, Calavera Negra y G2515 presentaron adaptación específica a estos ambientes de ellos, G2586 y G2021, de piel y carne color amarillo, mostraron valores de vitamina C superiores al promedio general con 7,79 y 7,49 mg AA/100g BS y retenciones después de la cocción de 53% y 46% (Tabla 12). Los otros genotipos presentaron valores menores al promedio general. Los genotipos G2515, G1781, G2021, Calavera Negra y G2586 presentaron adaptabilidad específica en los ambientes de Une\_A y Une\_B, con contenidos de vitamina C entre 5,91 a 7,79 mg AA/100g BS y retención desde 39 a 53% (Tabla 12). El genotipo Botella Roja presentó estabilidad en los dos tipos de muestras (crudas y cocidas). Similares estudios de Santacruz-Benavides et al. (2021), Cadersa et al. (2022) y Scavo et al. (2023), determinaron que el análisis de la interacción GxA es útil para los programas de mejoramiento genético para identificar los genotipos sobresalientes, que se adaptan a condiciones ambientales específicas en donde pueden tener importante desarrollo.

### 3.3.2 Rendimiento

Una de las variables más importante en el sistema productivo de papa es el rendimiento de tubérculos por unidad de área, por esto se buscó seleccionar en los genotipos evaluados aquellos que lograron este atributo de interés. Según los resultados obtenidos (Tabla 33), el rendimiento tuvo una media de 25,81 kg.15 m<sup>-2</sup> (17208 kg.ha<sup>-1</sup>), un máximo de 57,68 kg.15 m<sup>-2</sup> (38453 kg.ha<sup>-1</sup>) y un mínimo de 0,24 kg.15 m<sup>-2</sup> (160 kg.ha<sup>-1</sup>).

**Tabla 33.** Estadística descriptiva para rendimiento de 30 genotipos de papa diploide evaluados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Descripción	Rendimiento (kg.15 m <sup>2</sup> )	Rendimiento (kg.ha <sup>-1</sup> )
Media	25,81	17208
Máximo	57,68	38453
Mínimo	0,24	160
Desviación estándar	17,48	

En la Tabla 34 se observa el análisis de varianza combinado para rendimiento de tubérculos de los genotipos de papa diploide evaluados. Se presentaron diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,0001$ ) entre los ambientes, los genotipos y la interacción GxA. El coeficiente de determinación  $R^2$  fue de 0,92 y el coeficiente de variación fue de 23,21%.

**Tabla 34.** Análisis de varianza combinado para rendimiento de 30 genotipos de papa diploide evaluados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	Pr(>F)
Ambiente (A)	7	153447,38	21921,05***	<0.0001
Bloque (A)	16	2105,22	131,58***	0.0006
Genotipo (G)	29	63969,36	2205,84***	<0.0001
Interacción GxA	203	43632,84	214,94***	<0.0001
Error	464	23221,21	50,05	
Total	719	286376,02		
$R^2$		0,92		
CV (%)		23,21		

Los mayores rendimientos se obtuvieron en los dos ambientes de Zipaquirá\_A y Zipaquirá\_B y de Une\_A y Une\_B (Tabla 35). Entre estos ambientes no se presentaron diferencias estadísticas significativas. El menor rendimiento de tubérculos se obtuvo en los dos ambientes del municipio de El Rosal\_A y Rosal\_B (Tabla 35). En el ambiente de Rosal\_A se presentó estrés por saturación con una precipitación en el ciclo de cultivo de 1089 mm (Tabla 3). De igual manera, la textura limosa del suelo en estos ambientes (Tabla 4) condujo a encharcamiento temporal que limitaron el crecimiento del sistema radicular para la asimilación de nutrientes y con ello, el normal desarrollo de la planta. La papa diploide requiere de una textura de suelo franca para favorecer el crecimiento de

estolones y el llenado de los tubérculos (Guerrero-Riascos, 1998). La disponibilidad de nutrientes en el suelo es esencial para el crecimiento, rendimiento y calidad de los tubérculos (Zapata et al.,2022). Mozumder et al. (2014) reportaron que para obtener mayor rendimiento de la papa se requiere el uso de nutrientes en cantidades óptimas aplicados en el tiempo oportuno junto con la adecuada condición climática para el desarrollo.

La condición de estrés por sequía en los primeros estadios de crecimiento de las plantas y formación de estolones es un factor que disminuye el rendimiento, así como sucedió con los genotipos establecidos en el ambiente de Rosal\_B. Olivares et al. (2019) afirman que las mayores demandas de agua en un cultivo de papa suceden en las etapas de emergencia y crecimiento de los tubérculos por ser etapas críticas y afecta en gran medida el rendimiento.

**Tabla 35.** Comparación de medias para rendimiento de los genotipos evaluados en los ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

Ambientes	Medias rendimiento de tubérculos (kg.15m <sup>-2</sup> )	Medias rendimiento de tubérculos (kg.ha <sup>-1</sup> )
Zipaquirá_A	39,26 a*	26173 a*
Une_B	39,12 a	26078 a
Zipaquirá_B	37,65 a	25102 a
Une_A	36,84 a	24563 a
Tibaitatá_B	22,27 b	14852 b
Tibaitatá_A	17,65 b	11764 b
Rosal_A	7,98 c	5319 c
Rosal_B	5,72 c	3815 c

*Nota.* \*Valores con la misma letra no son diferentes a nivel significativo. Tukey (P≤0,01)

En Colombia, para el cultivo de papa los requerimientos hídricos son de 900 mm/ciclo de producción (Porras y Herrera, 2015), sin embargo, depende también de las condiciones de temperatura del aire, capacidad de almacenamiento del suelo y la variedad. Rivadeneira et al. (2016), evaluaron el rendimiento en 14 genotipos de papa (*Solanum sp.*) en cuatro ambientes de la Sierra del Ecuador y reportaron en tres ambientes rendimientos mayores a 40 t.ha<sup>-1</sup>, mientras que el rendimiento menor de 20,6 t.ha<sup>-1</sup> se obtuvo en el ambiente con una precipitación de 351,2 mm para el ciclo de producción, lo que indica la gran afectación por déficit de agua en un cultivo de papa para el rendimiento.

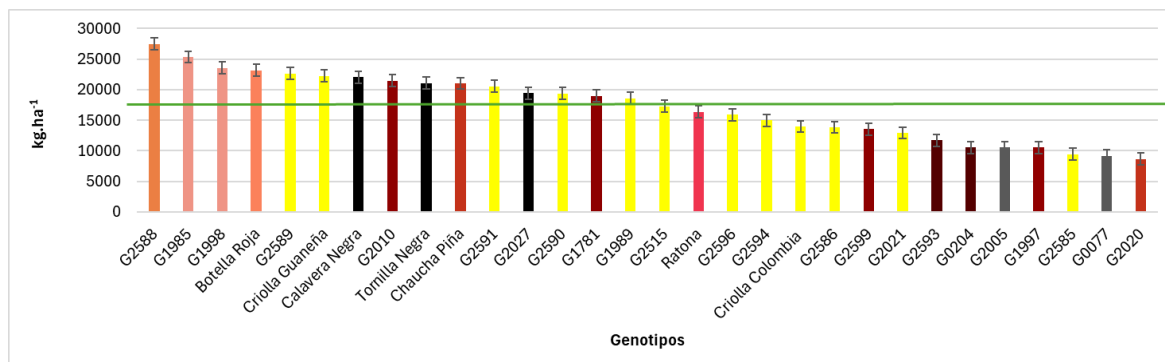
En la Figura 11 y en la Tabla 36 se observa la comparación de medias para rendimiento en los genotipos evaluados. Los genotipos con rendimientos superiores a 22000 kg.ha<sup>-1</sup> fueron G1985, G2588, Calavera Negra, G1998 y Botella Roja; y, los genotipos G1985 y G2588, sobresalieron con rendimientos superiores a 25000 kg.ha<sup>-1</sup> que se caracterizaron por presentar colores de piel rojo y morado oscuro. Los genotipos mencionados tuvieron rendimientos por encima del promedio general de 25,81 kg.15 m<sup>-2</sup> (17208 kg.ha<sup>-1</sup>) (Tabla 33).

Los genotipos G2591, Chaucha Piña, Tornilla Negra, G2589, Criolla Guaneña y G2010 no presentaron diferencias estadísticas significativas entre sí con un rango de rendimiento promedio entre 20552 y 22620 kg.ha<sup>-1</sup>. Siguieron los genotipos G1989, G2590, G2027 y G1781 que no tuvieron diferencias estadísticas significativas entre sí con un rango de rendimiento de 18561 a 19424 kg.ha<sup>-1</sup> (Tabla 36). El genotipo G2020 que se destacó con valores altos de CAO por ABTS, CAO por FRAP, fenoles totales y vitamina C en crudo, fue el de menor rendimiento de 12,94 kg.15m<sup>-2</sup> (8629 kg.ha<sup>-1</sup>). Otros siete genotipos fueron estadísticamente iguales a este genotipo y presentaron rendimiento medio entre 13,8 kg.15 m<sup>-2</sup> (9182 kg.ha<sup>-1</sup>) y 19,4 kg.15 m<sup>-2</sup> (12927 kg.ha<sup>-1</sup>), como se observa en la Tabla 36 y Figura 11.

Seminario-Cunya et al. (2018), evaluaron 17 cultivares del Grupo Phureja en Perú, obteniendo 22 ± 9 tubérculos por planta en promedio y encontraron variación entre los genotipos desde 9 hasta 35 tubérculos por planta. Los cultivares presentaron diferencias altamente significativas en rendimiento por peso total y peso comercial de tubérculos. El promedio del rendimiento fue de 17,7 t.ha<sup>-1</sup> y los cultivares estudiados mostraron un rango de rendimiento entre 7,3 a 27,8 t.ha<sup>-1</sup>. Tirado et al. (2018) evaluaron el rendimiento en dos variedades comerciales y 14 clones avanzados de papa cultivados en 4 ambientes. Identificaron dos clones y una variedad comercial por estabilidad y altos valores de rendimiento de 1124,54; 1115,62 y 1001,35 g/planta, respectivamente. El promedio fue de 957,08 g/planta para los 16 cultivares y con un rango de rendimientos entre 787,40 a 1124,54 g/planta.

Adicionalmente, Rodríguez et al. (2009) evaluaron el rendimiento de nueve cultivares de papa diploide en cuatro localidades del departamento de Antioquia (Colombia). Reportaron que las variedades diploides: Criolla Latina produjo un rendimiento entre 18 y

20 t.ha<sup>-1</sup>; Criolla Paisa mostró un rendimiento de 22 a 25 t.ha<sup>-1</sup> y Criolla Colombia obtuvo un rendimiento entre 13 y 15 t ha<sup>-1</sup>. Arias et al. (1996) obtuvieron entre 90 y 120 tubérculos/m<sup>2</sup> según la variación de la densidad de siembra, del genotipo Yema de Huevo del Grupo Phureja, registrado como Criolla Colombia.



**Figura 11.** Promedio de rendimiento de los 30 genotipos de papa diploide evaluados en ocho ambientes del departamento de Cundinamarca

El análisis de varianza AMMI para la variable de rendimiento mostró diferencias altamente significativas ( $P < 0,001$ ) en todas las fuentes de variación (Tabla 37). Las contribuciones del ambiente, genotipo y la interacción GxA explicaron un 87,01% ( $P < 0,001$ ) de la suma de cuadrados totales para rendimiento de tubérculo. La mayor contribución estuvo dada por el efecto ambiental con 48,61%. Las evaluaciones de rendimiento en los genotipos evaluados se realizaron a la culminación del ciclo de cultivo que estuvo entre 110 a 119 días después de emergencia y se alcanzó un coeficiente de determinación de 0,87 (Tabla 37).

**Tabla 36.** Comparación de medias para rendimiento de 30 genotipos de papa diploide evaluados

Genotipo	Rendimiento de tubérculos (kg.15 m <sup>-2</sup> )	Rendimiento de tubérculos (kg.ha <sup>-1</sup> )
G2020	12,94 a*	8629 a*
G0077	13,77 a	9182 a
G2585	14,19 ab	9460 ab
G1997	15,78 abc	10520 abc
G2005	15,82 abc	10548 abc
G0204	15,83 abc	10553 abc
G2593	17,53 abcd	11688 abcd
G2021	19,39 abcde	12927 abcde
G2599	20,30 bcdef	13533 bcdef
G2586	20,77 cdef	13846 cdef
Criolla Colombia	20,95 cdef	13967 cdef
G2594	22,48 defg	14986 defg
G2596	23,87 defgh	15916 defgh
Ratona	24,50 efghi	16336 efghi
G2515	25,93 fghij	17286 fghij
G1989	27,84 ghijk	18561 ghijk
G1781	28,45 ghijkl	18963 ghijkl
G2590	29,09 hijklm	19393 hijklm
G2027	29,14 hijklm	19424 hijklm
G2591	30,83 ijklm	20552 ijklm
Chaucha Piña	31,54 jklmn	21025 jklmn
Tornilla Negra	31,64 jklmn	21090 jklmn
G2010	32,14 jklmn	21429 jklmn
Calavera Negra	33,06 klmn	22042 klmn
Criolla Guaneña	33,40 klmn	22263 klmn
G2589	33,93 klmn	22620 klmn
Botella Roja	34,70 lmno	23132 lmno
G1998	35,35 mno	23564 mno
G1985	38,02 no	25343 no
G2588	41,20 o	27465 o

Nota. Resultados obtenidos en ensayos establecidos en 2013-2014.

\* Promedios seguidos con la misma letra, no son significativos en la columna, Tukey ( $p \leq 0,01$ ).

**Tabla 37.** Análisis de varianza AMMI para el rendimiento de 30 genotipos de papa diploide cultivados en ocho ambientes de cuatro municipios del departamento de Cundinamarca

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	Porcentaje (%)
Modelo	255	294677	26488,3	87,01
Ambiente (A)	7	164626	23517,9***	48,61
Bloque (A)	16	3401	212,5**	1,00
Genotipo (G)	29	72201	2489,7***	21,32
Interacción GxA	203	54449	268,2***	16,08
Error	464	43965	94,8	12,99
Total	719	338642		100
R <sup>2</sup>		0,8701		
CV (%)		23,21		

Nota. ns no significativo. \*\*\* Diferencias muy altamente significativas ( $P \leq 0,001$ ). \*\* Diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,01$ ). R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación (%).

En el análisis estadístico del modelo AMMI de la variable de rendimiento se obtuvieron siete CP, de los cuales, los primeros cuatro CP explicaron el 91,1% ( $P < 0,01$ ) de la variación total acumulada. Cabe resaltar que el CP1 aportó el 45,5% de la varianza total acumulada y el CP2 contribuyó con el 23,0% de la variación individual para un total de los CP1 y CP2 del 68,5% de la variación total acumulada (Tabla 38).

**Tabla 38.** Componentes principales del modelo AMMI para rendimiento de 30 genotipos de papa diploide

Componentes	Grados de libertad	Variación individual (%)	Variación total acumulada (%)	Suma cuadrados	Cuadrado medio
CP1	35	45,5	45,5	24752,39	707,21
CP2	33	23,0	68,5	12540,38	380,01
CP3	31	13,7	82,2	7437,42	239,92
CP4	29	8,9	91,1	4849,75	167,23
CP5	27	4,5	95,6	2461,54	91,17
CP6	25	3,5	99,1	1910,33	76,41
CP7	23	0,9	100	497,52	21,63

En la Tabla 39 se muestran los promedios de rendimiento con las coordenadas de los CP1 y CP2. En el CP1 el mayor efecto del ambiente se consiguió en Tibaitatá\_A (+4,14) y el efecto más desfavorable se produjo en Une\_B (-5,80); en el CP2 el mayor efecto favorable de la interacción GxA se ostentó en Une\_A (+4,42) y lo opuesto fue en Tibaitatá\_B (-6,03).

El ambiente Une\_B presentó variables climáticas óptimas para el normal desarrollo de las plantas (Tabla 3) y el ambiente Une\_A ostentó baja precipitación al ciclo de cultivo con 370,1 mm; no obstante, en las etapas críticas de emergencia y formación de tubérculos hubo precipitación. Lo anterior demuestra que para estos ambientes las variables de clima afectaron favorablemente la respuesta de rendimiento en los genotipos evaluados. Santacruz-Benavides et al. (2021), evaluaron 21 genotipos de papa para determinar la interacción GxA y reportaron que la respuesta del rendimiento en los genotipos es debido a los efectos del ambiente de cultivo como la altitud y el tipo de suelo. Los mayores rendimientos sucedieron en las localidades con altitudes por encima de 2820 msnm, mientras que las altitudes por debajo de 2108 msnm, los rendimientos estuvieron entre 24,94 a 31,89 t.ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 39.** Promedios de rendimiento y valores de componentes principales (CP) obtenidos con AMMI para 30 genotipos de papa diploide

Ambientes	Rendimiento de tubérculos (kg.15m <sup>2</sup> )	Rendimiento de tubérculos (kg.ha <sup>-1</sup> )	CP1	CP2
Rosal_A	7,98	5319	3,64	0,56
Rosal_B	5,72	3815	3,50	-1,02
Tibaitatá_A	17,65	11764	4,14	0,33
Tibaitatá_B	22,27	14852	-0,28	-6,03
Une_A	36,84	24563	-0,76	4,42
Une_B	39,12	26078	-5,80	-1,44
Zipaquirá_A	39,26	26173	-0,81	1,77
Zipaquirá_B	37,65	25102	-3,63	1,41
<b>Genotipos</b>				
Botella Roja	34,70	23132	-1,89	1,15
Calavera Negra	33,06	22042	-1,49	0,41
Chaucha Piña	31,54	21025	-0,21	1,94
Criolla Colombia	20,95	13967	1,16	0,79
G0077	13,77	9182	2,64	-0,69
G0204	15,83	10553	1,51	-1,06
G1781	28,45	18963	-1,99	-4,16
G1985	38,02	25343	-4,65	0,74
G1989	27,84	18561	0,002	0,87
G1997	15,78	10520	2,14	-0,105
G1998	35,35	23564	-0,97	2,01
G2005	15,82	10548	1,60	-0,96
G2010	32,14	21429	-2,33	-2,27
G2020	12,94	8629	2,22	-0,35
G2021	19,39	12927	2,59	2,08
G2027	29,14	19424	-0,92	-0,56
G2515	25,93	17286	0,94	-0,38
G2585	14,19	9460	1,08	-0,015
G2586	20,77	13846	0,83	0,11
G2588	41,20	27465	-1,68	0,34
G2589	33,93	22620	-1,46	0,67
G2590	29,09	19393	-0,63	0,32
G2591	30,83	20552	-0,64	0,18
G2593	17,53	11688	2,28	-1,06
G2594	22,48	14986	0,67	0,89
G2596	23,87	15916	-1,06	-0,47
G2599	20,30	13533	2,36	-0,06
Criolla Guaneña	33,40	22263	-0,88	0,80
Ratona	24,50	16336	-0,23	3,68
Tornilla Negra	31,64	21090	-0,98	2,53

La representación gráfica del biplot de la Figura 12, exhibe la contribución para rendimiento de tubérculos de los genotipos de papa diploide evaluados y los efectos de los ambientes a la interacción GxA.



en el rendimiento de genotipos de papa, Vásquez et al. (2021) reportaron que los efectos de las localidades, de los genotipos y de la interacción fueron altamente significativos e identificaron cuatro localidades con los mejores pesos totales de tubérculos entre 36,24 a 37,16 t.ha<sup>-1</sup>, bajo pisos altitudinales de 2950 a 3600 msnm y escasa precipitación desde 95,5 hasta 115,6 mm/ciclo de producción. Sin embargo, se obtuvieron rendimientos superiores al promedio de 37,11 t.ha<sup>-1</sup> en dos genotipos que sobresalieron con valores de rendimiento de 42,01 y 46,0 t.ha<sup>-1</sup> respondiendo bien a las condiciones desfavorables.

Los genotipos G2585, G1997 y G2599 mostraron adaptación específica con los ambientes Tibaitatá\_A y Rosal\_B, con rendimientos entre 14,19 y 20,30 kg.15 m<sup>-2</sup> (9460 y 13533 kg.ha<sup>-1</sup>), inferiores al promedio general. G2515, G2005, G0204, G2593, G0077 y G2020 mostraron adaptación específica al ambiente de Rosal\_B y exhibieron valores inferiores al promedio general, con promedios de 12,94 a 25,93 kg.15 m<sup>-2</sup> (8629 a 17286 kg.ha<sup>-1</sup>). El genotipo Ratona presentó adaptación específica con el ambiente de Tibaitatá\_B con un rendimiento de 24,50 kg.15 m<sup>-2</sup> (16336 kg.ha<sup>-1</sup>). Los genotipos G2596 y G2027 mostraron adaptación específica al ambiente Une\_B con valores de 23,87 y 29,14 kg.15 m<sup>-2</sup> (15916 y 19424 kg.ha<sup>-1</sup>) en su orden (Figura 12).

Los genotipos G2589, Botella Roja, Calavera Negra, Criolla Guaneña y G2588 presentaron adaptación específica para el ambiente de Zipaquirá\_B cuyos valores fueron superiores al promedio general en un rango de 33,06 a 41,20 kg.15 m<sup>-2</sup> (22042 a 27465 kg.ha<sup>-1</sup>) sobresaliendo G2588 con 41,20 kg.15 m<sup>-2</sup> (27465 kg.ha<sup>-1</sup>). Chaucha Piña, G1998 y Tornilla Negra, presentaron adaptación específica con los ambientes de Une\_A y Zipaquirá\_A, sus rendimientos estuvieron por encima de promedio general, así: 31,54; 35,35 y 31,64 kg.15 m<sup>-2</sup> (21025, 23564 y 21090 kg.ha<sup>-1</sup>), respectivamente. Sobresale G1998 (23564 kg.ha<sup>-1</sup>).

Zipaquirá\_A (26173 kg.ha<sup>-1</sup>), Zipaquirá\_B (25102 kg.ha<sup>-1</sup>), Une\_A (24563 kg.ha<sup>-1</sup>) y Une\_B (26078 kg.ha<sup>-1</sup>) produjeron el mayor rendimiento de tubérculos (Tabla 39). En los dos ambientes del municipio de Zipaquirá se produjo la mayor temperatura máxima de 21,7 a 22,7 °C (Tabla 3), ya que las temperaturas constituyen un factor fundamental dentro de las condiciones climáticas en un ambiente dado, que afectan los comportamientos del rendimiento en los genotipos evaluados (Martín-Martin y Jerez-Mompie, 2017). Estos ambientes junto con el ambiente de Une\_A presentaron

precipitaciones bajas en los ciclos de cultivo (Tabla 3), sin embargo, la distribución de las lluvias sucedió principalmente después de emergencia y en la formación de los tubérculos, por lo cual no fueron afectados los rendimientos de los genotipos (Morales-Rodríguez et al., 2015).

En el biplot de la Figura 12 se observan ángulos agudos y estrechos entre los ambientes de Rosal\_A con Tibaitatá\_A; Rosal\_B con Tibaitatá\_A; Une\_A con Zipaquirá\_A; Une\_B con Zipaquirá\_B que demuestran la correlación entre cada par de ambientes. Mayores magnitudes de los vectores se encontraron en los ambientes de Tibaitatá\_A con +4,14 y Rosal\_A con +3,64 que tuvieron efecto ambiental para la respuesta en rendimiento. Similar respuesta se observó en los ambientes de Une\_B (-5,80) y Zipaquirá\_B (-3,63) con aporte a la interacción GxA (Tabla 39).

### 3.3.3 Genotipos relevantes

En la Tabla 40 se observan los criterios de identificación de los genotipos relevantes de mayor respuesta en la investigación. Se identificaron genotipos estables y de adaptación específica. En muestra cruda, el genotipo Chaucha Piña presentó adaptación específica en los ambientes de Tibaitatá para las variables CAO por ABTS y por FRAP, y fenoles totales. Mientras que obtuvo adaptación específica con Une\_A para vitamina C y rendimiento. En muestra cocida, los genotipos Ratona y G2005 presentaron adaptación específica en todos los ambientes de estudio, donde se evaluaron los genotipos diploides para las variables de CAO por ABTS y por FRAP así como para fenoles totales.

El genotipo G1985 expresó estabilidad y obtuvo respuesta superior al promedio general en muestras crudas para las variables CAO por ABTS y por FRAP, y fenoles totales (Tablas 10 y 11). El genotipo Botella Roja expresó estabilidad a través de los ambientes en muestras crudas y cocidas, con valoraciones superiores al promedio general para CAO por ABTS y vitamina C (Tablas 10 y 12). El genotipo G2593 expresó estabilidad en muestras cocidas para CAO por ABTS, CAO por FRAP, fenoles totales y vitamina C; y también, mostró estabilidad en muestra crudas para CAO por ABTS con valores superiores a los promedios generales (Tablas 10, 11 y 12). El genotipo G2027 ostentó estabilidad con valores superiores al promedio general de fenoles totales en muestras crudas y cocidas (Tabla 11).

**Tabla 40.** Mejores genotipos identificados por la respuesta a las variables de evaluación

	Criterios	Ambiente	FRAP	ABTS	Fenoles totales	Vitamina C	Rendimiento de tubérculos	
<b>Muestra cruda</b>	Genotipos estables y con respuesta superior al promedio general de la variable	N/A	G1985 G0204	G2593	G1985	Botella Roja Criolla Colombia	G1989 G2590 G2591	
				G0077	G2027			
				G2010	G007			
				G0204	Ratona			
				G1985	Tornilla Negra			
	Genotipos inestables con respuesta superior al promedio general			G2005 G2010	G2020	G2588	G2594 G2591 G0204	G1781 G2010 G1985
					G2599	G1781		
						G1997		
						G2020		
						G2020		
Genotipos con adaptación específica Se requiere que trace líneas en para separar las localidades, para facilitar la lectura. Como está es confuso.	Zipa A y B Rosal_A Rosal_B Rosal_A y B Tiba_A Tiba_B Tiba_A y B	Chaucha Piña	G1997 G0077 G2021 G2020	G2005	G2593 G2599	Chaucha Piña G1998 Criolla Guaneña G2020	Chaucha Piña Tornilla Negra G2027 G2588 Botella Roja Calavera Negra Criolla Guaneña G2515	
								Une_A
								Une_B
								Zipa_A
								Zipa_B
								Tornilla Negra Chaucha Piña
<b>Muestra cocida</b>	Genotipos estables y con respuesta superior al promedio general	N/A	G2593 G2599	G2593	G0077	Chaucha Piña Botella Roja Tornilla Negra	G2594 G2593 G2005 G1997	
				G2027	G2593			
				Botella Roja	G2027			
				G1781	G2027			
				Tornilla Negra Chaucha Piña	Botella Roja Tornilla Negra			
	Genotipos inestables y con respuesta superior al promedio general		Chaucha Piña Tornilla Negra	G2021 G0204	G2020	G2020	G1985 G2591 G2027	
						G1998		
Genotipos de adaptación específica Similar observación a la anterior	Zipa A y B Rosal_A Rosal_B Rosal_A y B Tiba_A		G2005 G1997	G2005 Ratona	G2021 G1997 G1781 Ratona G2588 G2010 Tornilla Negra	G2586 G2021	N/A	
								Une_B
								Une_A y B
								Zipa_A
								Zipa_B
								G2010 G1989
								G2005 G0204
								G2005 Ratona

Los genotipos G1989, G2590 y G2591 mostraron estabilidad a través de los ambientes y repuntaron en rendimiento de tubérculos con valores superiores al promedio general (Tablas 33 y 36). Mientras que los genotipos de mayor aporte a la interacción para rendimiento fueron G1781, G2010 y G1985 (Tabla 36). El de mayor rendimiento fue G2588 y de adaptación específica en el ambiente de Zipaquirá\_B. En muestras crudas y cocidas, el genotipo G2020 obtuvo la mayor respuesta para CAO por ABTS y fenoles totales, superior al promedio general (Tablas 10 y 11), y de mayor efecto de interacción GXA; a la vez, fue el de menor rendimiento por unidad de área (Tabla 36); por esto, se recomienda a los programas de mejoramiento que evalúen en conjunto los atributos funcionales para el consumidor y atributos agronómicos para el productor, con el fin de liberar cultivares que posean un equilibrio en los atributos mencionados.

### 3.4 Conclusiones

El análisis de la interacción genotipo por ambiente mediante el modelo AMMI, permitió identificar para cada variable de estudio, genotipos estables, inestables y/o de adaptación específica, en el set de ambientes de evaluación en el departamento de Cundinamarca. Este análisis también permitió evidenciar alta correlación entre ambientes dentro de algunos municipios y ambientes contrastantes, para las muestras cruda y cocida de las variables capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP, fenoles totales y vitamina C, igualmente para rendimiento.

Los genotipos seleccionados G1985, Chaucha Piña, G2593, G0077 y Botella Roja mostraron atributos superiores de estabilidad y mayores valores al promedio general de las variables capacidad antioxidante por ABTS, por FRAP, fenoles totales y vitamina C. En cuanto a rendimiento presentaron estabilidad los genotipos G1989, G2590 y G2591 con valores superiores al promedio general.

Los ambientes del municipio de El Rosal fueron los de mayor aporte a la interacción genotipo por ambiente en las variables de fenoles totales, capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP, y vitamina C para muestra cruda. Estos ambientes presentaron estreses hídricos tanto por sequía como por saturación, lo que favoreció la activación de los mecanismos de defensa de las plantas y, con ellos, mayores expresiones de la actividad antioxidante en los genotipos estudiados.

El rendimiento promedio de tubérculos en el set de genotipos evaluados varió entre 27465 kg.ha<sup>-1</sup> (G2588) y 8629 kg.ha<sup>-1</sup> (G2020). Este último genotipo presentó valores altos de capacidad antioxidante por ABTS de 9405,94 µmol de Trolox/100g en muestra cruda y de 11067,49 µmol de Trolox/100g en muestra cocida con una tasa de aumento de 1,71.

### 3.5 Bibliografía

- Agronet. (2019). Reporte: área, producción y rendimiento nacional por cultivo. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Akyol, H., Riciputi, Y., Capanoglu, E., Caboni, M.F., Verardo, V. (2016). Phenolic Compounds in the Potato and Its Byproducts: An Overview. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(6), 835. <https://doi.org/10.3390/ijms17060835>
- Alzate Díaz, L.G., Cerón Lasso, M.S., Espitia Malagón, E.M., Coronel Ortiz, B. (2020). *Papa criolla Corpoica Sol Andina: la nueva variedad para el altiplano cundiboyacense, con atributos de consumo industrial y en fresco*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA. <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/view/145/127/1051-1>
- André, C.M., Oufir, M., Hoffmann, I., Hausman, J.F., Rogez, H., Larondelle, Y., Evers, D. (2009). Influence of environment and genotype on polyphenol compounds and in vitro antioxidant capacity of native Andean potatoes (*Solanum tuberosum* L.), *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(6), 517-524, <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.11.010>.
- Arias, V., Bustos, P., Núñez, C.E. (1996). Evaluación del rendimiento en papa criolla (*Solanum phureja*) variedad "yema de huevo", bajo diferentes densidades de siembra en la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*, 13(2),152-161
- Bahadori, S., Giglou, M. T., Esmailpour, B., Dehdar, B., Estaji, A., Hano, C., Gohari, G., Vergine, M., Vita, F. (2023). Antioxidant Compounds of potato breeding genotypes and commercial cultivars with yellow, light yellow, and white flesh in Iran. *Plants (Basel, Switzerland)*, 12(8), 1707. <https://doi.org/10.3390/plants12081707>
- Banerjee, H., Sarkar, S., Ray, K., Rana, L., Chakraborty, A. (2016). Integrated nutrient management in potato based cropping system in alluvial soil of West Bengal. *Annals of Plant and Soil Research*. 18. 8-13.

- Bellumori, M., Chasquibol Silva, N.A., Vilca, L., Andrenelli, L., Cecchi, L., Innocenti, M., Balli, D., Mulinacci, N.A. (2020). Study on the Biodiversity of Pigmented Andean Potatoes: Nutritional Profile and Phenolic Composition. *Molecules*, 10;25(14):3169. doi:10.3390/molecules25143169. PMID:32664446; PMCID: PMC7397087.
- Cadersa, Y., Santchurn, D., Govinden Soulangé, J., Sauntally, S., Parmessur, Y. (2022). Genotype-by-environment interaction for marketable tuber yield in advanced potato clones using AMMI and GGE methods. *African Crop Science Journal*, 30(3), 331-346. <https://doi.org/10.4314/acsj.v30i3.5>
- Camacho-Escobar, M.A., Ramos-Ramos, D.A., Ávila-Serrano, N.Y., Sánchez-Bernal, E.I., López-Garrido, S.J. (2020). Las defensas físico-químicas de las plantas y su efecto en la alimentación de los rumiantes. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 443-453. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.629>
- Cerón, M.S., Prieto, L., Garnica, A.M., Gabriel Ortega, J. (Eds.). (2022). *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia*. Editorial Grupo Compás. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/38030>
- Crossa, J., Gauch, H.G., Zobel, R.W. (1990). Additive main effect and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Science*, 30(3), 493-500. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000030003x>
- Franková, H., Šnirc, M., Jančo, I., Čeryová, N., Ňorbová, M., Lidiková, J., Musilová, J. (2022). Total polyphenols and antioxidant activity in sweet potatoes (*Ipomoea batatas* L.) after heat treatment. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 11(6), e5356. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.5356>
- Frutos-Bernal, E. (2011). *Interacción genotipo-ambiente GGE biplot y modelo AMMI*. [Tesis de Maestría]. Universidad de Salamanca.
- Gabriel, J., Veramendi, S., Angulo, A., Magne, J. (2013). Respuesta de variedades mejoradas de papa (*Solanum tuberosum* L.) al estrés hídrico por sequía. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 1(1), 33-44. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2308-38592013000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592013000100004&lng=es&tlng=es).
- García, P.J., Pérez, A.A., Silva, R.J., Álvarez, R.M., Monasterio, P.P., Taramona, L.A. (2020). Evaluación del potencial agronómico de híbridos de maíz amarillo basado en el análisis GGE biplot y el modelo AMMI. *Bioagro*, 32(2), 95-106.

- Garnica, A.M., Prieto, L., Álvarez, C.P., Cerón, M.S. (2022a). Aprovechamiento potencial de la papa diploide (*Solanum phureja* Juz. Juz. et Buk.) para la Industria Alimentaria. En: M.S. Cerón, L. Prieto, A.M. Garnica y J. Gabriel Ortega (Eds.), *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia* (pp. 391-441). Editorial Grupo Compás. <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/894>
- Garnica, A.M., Prieto, L., Álvarez, C.P., Poveda, J.C., Cerón, M.S., Molina, Y. (2022b). Análisis físico y nutricional de tubérculos de papa diploide (*Solanum phureja* Juz. et Buk.). En: M.S. Cerón, L. Prieto, A.M. Garnica y J. Gabriel Ortega (Eds.), *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia* (pp. 357-390). Editorial Grupo Compás. <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/894>
- Grudzińska, M., Czerko, Z., Zarzyńska, K., Borowska-Komenda, M. (2016). Bioactive compounds in potato tubers: effects of farming system, cooking method, and flesh color. *PLoS ONE* 11(5): e0153980. doi: 10.1371/journal.pone.0153980
- Hamouz, K., Bečka, D., Capouchová, I. (2018). Ascorbic acid content in potato tubers with coloured flesh as affected by genotype, environment, and storage. *Plant, Soil and Environment* 64, (12), 605–611. <https://doi.org/10.17221/542/2018-PSE>
- Hamouz, K., Lachman, J., Dvořák, P., Jůzl, M., Pivec., V. (2006). The effect of site conditions, variety and fertilization on the content of polyphenols in potato tubers. *Plant Soil Environment*, 52(9): 407–412. <http://www.agriculturejournals.cz/pdfs/pse/2006/09/04.pdf>
- Hrabovská, D., Heldák, J., Volnová, B. (2013). Changes in the content of vitamin c in potato tubers depending on variety. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences* 2 (Special issue 1), 2052-2058.
- Huamán, Z. (2008). *Descriptores morfológicos de la papa (Solanum tuberosum L.)*. Centro de Conservación de la Biodiversidad Agrícola de Tenerife (CCBAT).
- Huerta, P., Seminario-Cunya, A., Arce, V., Seminario, J., Honorio Acosta, M., Fernández, A. (2021). Productividad de quince cultivares tradicionales de papa Phureja en ocho ambientes distintos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12. 949-960. Doi: [10.29312/remexca.v12i6.2582](https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2582).

- Jiménez, M., Rossi, A., Sammán, N. (2015). Changes during cooking processes in 6 varieties of Andean potatoes (*Solanum tuberosum* ssp. *Andigenum*). *American Journal of Plant Sciences*. 06. 725-736. [Doi: 10.4236/ajps.2015.65078](https://doi.org/10.4236/ajps.2015.65078).
- Lagos-Burbano, T.C. (2023). Análisis estadístico para el mejoramiento genético vegetal. Editorial Universitaria, Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Grupo de Investigación en Producción de Frutales Andinos – GPFA. [https://sired.udenar.edu.co/7672/2/vf4\\_2021\\_An%C3%A1lisis%20estad%C3%ADstico%20para%20el%20mejoramiento%20gen%C3%A9tico%20vegetal.pdf](https://sired.udenar.edu.co/7672/2/vf4_2021_An%C3%A1lisis%20estad%C3%ADstico%20para%20el%20mejoramiento%20gen%C3%A9tico%20vegetal.pdf)
- Lizarazo-Peña, P.A., Moreno-Fonseca, L.P., Núñez-López, C.E. (2022). Rendimiento y variables poscosecha de cultivares de papa del grupo Phureja en ambientes contrastantes por altitud de la región Andina central de Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2). [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num2\\_art:2197](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2197)
- Márquez-Vasallo, Y., Salomón-Díaz, J.L., Acosta-Roca, R. (2020). Análisis de la interacción genotipo ambiente en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Cultivos Tropicales*, 41(1), e10. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362020000100010&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362020000100010&lng=es&tlng=es).
- Martín-Martin, R., Jerez-Mompie, E. (2017). Efecto de las temperaturas en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad Romano. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 75-80. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362017000100009&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000100009&lng=es&tlng=es)
- Mejía-Salazar, J.R., Galeano-Mendoza, C.H., Burbano-Erazo, E., Vallejo-Cabrera, F.A., Arango, M. (2020). Interacción genotipo por ambiente de nueve variedades de algodón para los Valles interandinos en Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 31-42. <https://dx.doi.org/10.15517/am.v31i1.37178>
- Méndez-Espinoza, C., Vallejo-Reyna, M.A. (2019). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(56), 33-64. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.567>
- Morales-Rodríguez, A., Morales-Tejón, A., Rodríguez del Sol, D. (2015b). Índices agronómicos para determinar tolerancia a sequía en variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agrisost*, 22(1), 1-8. [doi:10.1000/agr.v22i1.122](https://doi.org/10.1000/agr.v22i1.122)

- Mozumder, M., Banerjee, H., Ray, K., Paul, T. (2014). Evaluation of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars for productivity, nitrogen requirement and eco-friendly indices under different nitrogen levels. *Indian Journal of Agronomy*, 59: 327–335.
- Ñústez-López, C.E., Rodríguez-Molano, L.E. (2020). Papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja): Manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de Cundinamarca. Bogotá, D. C.: Corredor Tecnológico Agroindustrial CTA-2
- Olivares, B.O., Hernández, R.A., Rodríguez-Rondón, J.M. (2019). Sectorización ecoterritorial para la producción agrícola sostenible del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Carabobo, Venezuela. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2), 323-354. <https://doi.org/10.21930/rcta.vol20num2art:1462>
- Pinhero, R., Tsao, R., Liu, Q., Sullivan, J., Bizimungu, B., Yada, R. (2016) Protein and Phenolic Contents and Antioxidant Activities of 14 Early Maturing Potatoes as Affected by Processing. *American Journal of Plant Sciences*, 7, 69-81. doi: 10.4236/ajps.2016.71008.
- Porras, P.D., Herrera, C.A. (2015). Modelo productivo de la papa criolla para los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Mosquera, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica]. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13752>.
- Prasanna, R., Bidyarani, N., Babu, S., Hossain, F., Shivay, Y.S., Nain, L. (2015). Cyanobacterial inoculation elicits plant defense response and enhanced Zn mobilization in maize hybrids. *Cogent Food & Agriculture*, 1, 998507.
- Quevedo, J.E. (2018). *Aplicación del modelo estadístico AMMI como método de selección en mejoramiento de plantas de cultivos anuales*. [Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica de Pereira].
- Reddivari, L., Hale, A.L., Miller, J.C. (2007). Determination of Phenolic Content, Composition and their Contribution to Antioxidant Activity in Specialty Potato Selections. *American Journal of Potato Research*, 84 (4), 275-282. <https://doi.org/10.1007/BF02986239>
- Rivadeneira, J., Ortega, D., Morales, V., Monteros, C., Cuesta, X. (2016). Efecto de la interacción genotipo por ambiente sobre los contenidos de hierro, zinc y vitamina C en genotipos de papa (*Solanum sp.*). *Revista Latinoamericana de la Papa*, 20(1), 32-45. <https://doi.org/10.37066/ralap.v20i1.242>
- Rodríguez, L.E., Ñústez, C.E., Estrada, N. (2009). Criolla Latina, Criolla Paisa y Criolla Colombia, nuevos cultivares de papa criolla para el departamento de Antioquia

- (Colombia). *Agronomía Colombiana*, 27(3), 289-303.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-99652009000300002&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652009000300002&lng=en&tlng=es)
- Ru, W., Pang, Y., Gan, Y., Liu, Q., Bao, J. (2019). Phenolic Compounds and Antioxidant Activities of Potato Cultivars with White, Yellow, Red and Purple Flesh. *Antioxidants* (Basel). 20;8(10):419. doi: 10.3390/antiox8100419. PMID: 31547004; PMCID: PMC6827044.
- Saldaña-Villota, T.M., Cotes-Torres, J.M. (2020). Functional growth analysis of diploid potato cultivars (*Solanum phureja* Juz. et Buk.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(3), 402–415. <https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i3.10870>
- Samaniego, I., Espin, S., Cuesta, X., Arias, V., Rubio, A., Llerena, W., Angós, I., Carrillo, W. (2020). Analysis of Environmental Conditions Effect in the Phytochemical Composition of Potato (*Solanum tuberosum*) Cultivars. *Plants* (Basel, Switzerland), 9(7), 815. <https://doi.org/10.3390/plants9070815>
- Santacruz-Benavides, A.V., Delgado-Gualmatán, W.L., Lagos-Burbano, T.C., y Duarte-Alvarado, D.E. (2021). Genotype-environment interaction and guata potato yield (*Solanum tuberosum* L.) in the Department of Nariño (Colombia). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(3), e12872. <https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i3.12872>
- SAS Institute. (2004). Statistical Analysis System – SAS (Version 9.0) [Software]. Estados Unidos. [www.sas.com/en](http://www.sas.com/en)
- Scavo, A., Mauromicale, G., Ierna, A. (2023). Genotype x environment interactions of potato tuber quality characteristics by AMMI and GGE biplot analysis, *Scientia Horticulturae*, volume 310, 111750, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111750>
- Seminario-Cunya, J.F., Villanueva-Guevara, R., y Valdez-Yopla, M.H. (2018). Rendimiento de cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) amarillos precoces del grupo Phureja. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 639-653. <https://dx.doi.org/10.15517/ma.v29i3.32623>
- Ševčík, R.; Kondrashov, A.; Kvasnicka, F.; Vacek, J.; Hamouz, K.; Jiruskova, M.; Voldrich, M., Cizkova, H. (2009). The impact of cooking procedures on antioxidant capacity of potatoes. *J Food Nutr Res* 48: 171-177
- Tierno-Fernández, R. (2017). *Mejora genética de patata para compuestos bioactivos y capacidad antioxidante*. [Tesis de Doctorado]. Universidad del País Vasco.

- Tirado, R., Tirado, R., Mendoza, J. (2018). Interacción genotipo x ambiente en rendimiento de papa (*Solanum tuberosum* L.) con pulpa pigmentada en Cutervo, Perú. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 34(3), 191-198. <https://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902018005000502>
- Valbuena, R.I., Roveda, G., Bolaños, A., Zapata, J.L., Medina, C.I., Almanza, P.J., Porras, P.D. (2009). Escalas fenológicas de las variedades de papa parda pastusa, diacol capiro y criolla “yema de huevo” en las zonas productoras de Cundinamarca, Boyacá, Nariño Y Antioquia. Corpoica, Cevipapa, Fedepapa, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Colombia. [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12893/44240\\_56518.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12893/44240_56518.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Vargas-Escobar, E.A., Vargas-Sánchez, J.E., Baena-García, D. (2016). Análisis de estabilidad y adaptabilidad de híbridos de maíz de alta calidad proteica en diferentes zonas Agroecológicas de Colombia. *Acta Agronómica*, 65(1),72-79. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169943143012>
- Vásquez, V., Huerta, P., Cabrera, H., Jiménez, L. (2021). Interacción genotipo-ambiente en el rendimiento de genotipos de papa. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(2), 175-182. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2538>
- Vásquez, V., Cabrera, H.A., Jiménez, L.A., Colunche, A. (2019). Estabilidad del rendimiento de genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Ecología Aplicada*, 18(1), 59-65. <https://dx.doi.org/10.21707/rea.v18i1.1307>
- Vázquez-Carrillo, M.G., Santiago-Ramos, D., Rubio-Covarrubias, O.A., Torres-Cervantes, C.M., Ayala-Rosas, A.R., Vargas-Vázquez, M.L.P. (2016). Efecto ambiental en características fisicoquímicas de papas de la Mesa Central de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5),1051-1064.
- Westermann, D.T. (2005). Nutritional requirements of potatoes. *Am. J. Pot Res* 82, 301–307. <https://doi.org/10.1007/BF02871960>
- Wissar, R. (1994). *Parámetros de estabilidad fenotípica. Curso de manejo de Germoplasma de papa*. Centro Internacional de la Papa: Lima-Perú.
- Xing, Y., Niu, X., Wang, N., Jiang, W., Gao, Y., Wang, X. (2020). The correlation between soil nutrient and potato quality in loess plateau of China based on PLSR. *Sustainability* 12, no. 4: 1588. <https://doi.org/10.3390/su12041588>

- Zapata, J.L., Cerón, M.S., Porras, P.D., Herrera, C.A. (2022). Manejo integral del cultivo de papa diploide (*Solanum phureja* Juz. et Buk.). En: M.S. Cerón, L. Prieto, A.M. Garnica y J. Gabriel Ortega (Eds.), *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia* (pp. 87-121). Editorial Grupo Compás. <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/894>
- Zarzecka, K., Gugala, M., Sikorska, A., Mystkowska, I., Baranowska, A., Niewęglowski, M., Dołęga, H. (2019). The effect of herbicides and biostimulants on polyphenol content of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers and leaves. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(1), 102-106. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.02.004>
- Zewide, I., Ibrahim, A.M., Tadesse, S. (2012). Effect of Different Rates of Nitrogen and Phosphorus on Yield and Yield Components of Potato (*Solanum tuberosum* L.) at Masha District, Southwestern Ethiopia. *International Journal of Soil Science*. 7. 146-156. [Doi: 10.3923/ijss.2012.146.156.](https://doi.org/10.3923/ijss.2012.146.156)
- Zhang, B., Murtaza, A., Iqbal, A., Zhang, J., Bai, T., Ma, W., Xu, X., Pan, S., Hu, W. (2022). Comparative study on nutrient composition and antioxidant capacity of potato based on geographical and climatic factors. *Food Bioscience*. 46: 101536. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101536>
- Zobel, R.W., Wright, M.J., Gauch Jr., H.G. (1988) Statistical Analysis of a Yield Trial. *Agron. J.*, 80 (3), 388-393. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>



## 4. Composición fisicoquímica y aporte a la ingesta de la población colombiana de genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja)

### Resumen

Es importante valorar los contenidos fisicoquímicos y nutricionales de genotipos de papa diploide para su aprovechamiento. Por esto, se propuso evaluar la composición fisicoquímica de 20 genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) del banco de germoplasma vegetal (AGROSAVIA), más la variedad Criolla Colombia como testigo. Los contenidos de materia seca, cenizas, proteínas, almidón, azúcares totales, azúcares reductores y vitamina C se determinaron mediante métodos estandarizados. Con la proteína, los carbohidratos y la vitamina C encontrados se estimó el aporte a la ingesta de energía y de nutrientes para niños y adultos de la población colombiana. El análisis fisicoquímico mostró variaciones altamente significativas ( $P \leq 0,001$ ) en muestra cruda, excepto proteína. El porcentaje de materia seca de los genotipos evaluados estuvo entre 22,75 y 27,94%. Los rangos en base húmeda cuantificaron entre 14,44 y 22,4% de almidón; 0,96 y 2,56% de cenizas; 16,38 y 23,67% de azúcares totales; 0,88 y 3,8% de azúcares reductores; y en base seca 6,95 y 11,38% de proteínas. El genotipo G2589 sobresalió en aportes de ingesta de energía de 102,88 kcal y de carbohidratos con 18,21% a la dieta diaria recomendada de 130 g/día de carbohidratos. El valor más alto de aporte a la ingesta de proteína la presentó el genotipo G2593 (5,32%) y el genotipo G2585 que mostró la mayor retención de vitamina C en muestras cocidas (66,93%), resaltó con el 22,27% de aporte de esta vitamina a la ingesta de niños colombianos.

**Palabras clave:** análisis químico, nutrición, ingestión de alimentos, dieta

## Abstract

It is important to assess physicochemical and nutritional contents of diploid potato genotypes for their use. For this reason, it was proposed to evaluate the physicochemical composition of 20 diploid potato genotypes (*Solanum tuberosum* Group Phureja) from the plant germplasm bank (AGROSAVIA), plus Criolla Colombia variety as a control. The contents of dry matter, ash, proteins, starch, total sugars, reducing sugars, and vitamin C were determined using standardized methods. With protein, carbohydrates and vitamin C found was estimated the contribution to the intake of energy and nutrient for children and adults of Colombian population. The physicochemical analysis showed highly significant variations ( $P \leq 0.001$ ) in raw sample, except protein. The percentage of dry matter of evaluated genotypes was between 22.75 and 27.94%. The ranges on a wet basis quantified between 14.44 and 22.4% of starch; 0.96 and 2.56% of ashes; 16.38 and 23.67% of total sugars; 0.88 and 3.8% of reducing sugars; and on a dry basis 6.95 and 11.38% of protein. The genotype G2589 stood out in energy intake contributions of 102.88 kcal and carbohydrates with 18.21% of the recommended daily diet of 130 g/day of carbohydrates. The highest value of contribution to protein intake was presented by G2593 genotype (5.32%) and G2585 genotype showed the highest retention of vitamin C in cooked samples (66.93%), stood out with 22.27% of contribution of this vitamin to the intake of Colombian children.

**Keywords:** chemical analysis, nutrition, food intake, diet.

## 4.1 Introducción

Es importante caracterizar físicoquímicamente la papa para determinar y cuantificar los componentes nutricionales presentes en una variedad o genotipo específico, con el fin de dar a conocer los aportes reales de estos componentes durante la ingesta del consumidor, quien realiza diversas preparaciones de los tubérculos. Diferentes investigaciones reportan los contenidos nutricionales de tubérculos de papa en crudo y en cocido, así como los cambios que suceden en algunos compuestos del tubérculo durante los procesos de preparación para su consumo. Espín et al. (2004) evaluaron el efecto de las preparaciones culinarias en tubérculos y raíces andinas, demostrando que

la caracterización fisicoquímica de las diferentes especies estudiadas en crudo cambia al perderse algunos nutrientes durante las preparaciones gastronómicas de estas especies.

Las caracterizaciones fisicoquímicas y nutricionales de la papa (*Solanum tuberosum* L.) han sido ampliamente estudiadas y reportadas, entre las cuales se resalta el aporte de carbohidratos como el almidón y los azúcares; de proteínas y fibra dietaria como componentes mayoritarios; de minerales como magnesio, hierro, calcio, potasio y fósforo; de vitamina C y vitaminas del complejo B como tiamina (B1), niacina (B3) y piridoxina (B6) (Zaheer y Akhtar, 2016). Estos nutrientes privilegian la papa como una fuente importante en la dieta humana y por ello, se considera como un alimento completo.

Según Akyol et al. (2016), en los tubérculos de papa se encuentran biocompuestos con potencial antioxidante como ácido ascórbico,  $\alpha$ -tocoferol, carotenoides, diferentes polifenoles y ácidos fenólicos como el ácido clorogénico, principal representante de este grupo (López-Cobo et al., 2014). Tanto la piel (peridermo) como la carne (sistema vascular, el parénquima de reserva y la médula) del tubérculo de papa contienen sustancias antioxidantes, pero se ha demostrado que la mayoría de estos compuestos se encuentran en la piel, lo cual lo hace atractivo para el aprovechamiento de su consumo gastronómico y para la industria alimentaria (Akyol et al., 2016). Diversas accesiones de *Solanum tuberosum* L., contienen compuestos bioactivos más altos que otros cultivos de igual importancia como arroz, trigo y maíz.

Por todo lo anterior, la papa ofrece ventajas nutricionales para la ingesta de los consumidores con compuestos que impactan la salud humana; Burgos et al. (2020), afirman que la ingesta de los nutrientes de la papa presenta una contribución significativa a los requerimientos de la dieta humana. Además, reportan que en los países desarrollados la ingesta de papa varía entre 50 a 150 g/día para adultos, mientras que en Latinoamérica la ingesta es más alta entre 300 a 800 g/día para adultos, favoreciendo a los consumidores con la biodisponibilidad de nutrientes como minerales, vitaminas, proteínas, entre otros.

En cuanto a los genotipos de papa *Solanum tuberosum* Grupo Phureja presentan diversidad de colores amarillos, rojizos y púrpuras en la piel o en la carne, los cuales se deben a la presencia de compuestos bioactivos en el tubérculo como la vitamina C

(Burgos et al., 2013). Colombia posee amplia diversidad genética en papa del Grupo Phureja, de alta tradición de cultivo en la comunidad campesina y buen consumo nacional. Los genotipos de papa diploide del germoplasma colombiano favorecen a la ingesta de energía y de nutrientes pues poseen altos contenidos de almidón, proteínas y minerales (Peña-Melo, 2015). Por tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la composición fisicoquímica de 21 genotipos de papa diploide *Solanum tuberosum* Grupo Phureja sembrados en un ciclo de producción en el municipio de El Rosal, departamento de Cundinamarca, Colombia, y su contribución a la ingesta de la población colombiana.

## 4.2 Materiales y métodos

### 4.2.1 Localización

Los genotipos de papa diploide se sembraron y se recolectaron en el municipio de El Rosal (departamento de Cundinamarca, Colombia), ubicado a 4°52'32,62''N; 74°15'17,61''O y a 2689 msnm con temperatura promedio de 15,6°C. Presentó una precipitación al ciclo de cultivo de 637,8 mm y humedad relativa de 86,54%. Bajo estas condiciones se sembró en abril y se cosechó en agosto del año 2014 denominado Rosal\_B.

### 4.2.2 Material vegetal

Las pruebas en campo y en laboratorio se llevaron a cabo con 20 genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) procedentes del banco de germoplasma vegetal (Figura 13) que administra AGROSAVIA (antes Corpoica), más la variedad comercial Criolla Colombia como testigo. La siembra se realizó bajo el diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, la unidad experimental consistió en una parcela de 15 m<sup>2</sup> de área con tres surcos de 5 m de longitud, separados a 1 m y se sembraron 51 tubérculos con una distancia de 0,30 m entre plantas. De cada unidad experimental se cosechó el surco central, separando tres plantas al azar, de las que se tomó una muestra de diez tubérculos para realizar los diferentes análisis de laboratorio. Estas determinaciones se hicieron por triplicado por cada repetición de campo.

En el ensayo establecido, el manejo del cultivo se realizó teniendo en cuenta las recomendaciones técnicas para la papa diploide, de Porras y Herrera (2015), Valbuena et al. (2009) y Zapata et al. (2006). La fertilización se efectuó con el compuesto químico 13-26-6 en dosis de 22 g por planta en la siembra (Saldaña-Villota y Cotes-Torres, 2020), a razón de 94 kg N.ha<sup>-1</sup>, 189 kg P.ha<sup>-1</sup> y 44 kg K.ha<sup>-1</sup> para un total de 726 kg.ha<sup>-1</sup>. Las características fisicoquímicas del suelo del ambiente El Rosal\_B presentaron 5,18 de pH, textura limosa, 6,42% de materia orgánica, 0,31 cmol<sub>(+)</sub>/kg de potasio intercambiable, 0,87 cmol<sub>(+)</sub>/kg de sodio intercambiable, 0,05 cmol<sub>(+)</sub>/kg de aluminio intercambiable, 70,52 mg/kg de fósforo disponible, 1580 mg/kg de hierro disponible, 37,0 mg/kg de Zn disponible, 0,42 Al+H (cmol<sub>(+)</sub>/kg) de acidez, entre otros, como se observan en la Tabla 4.

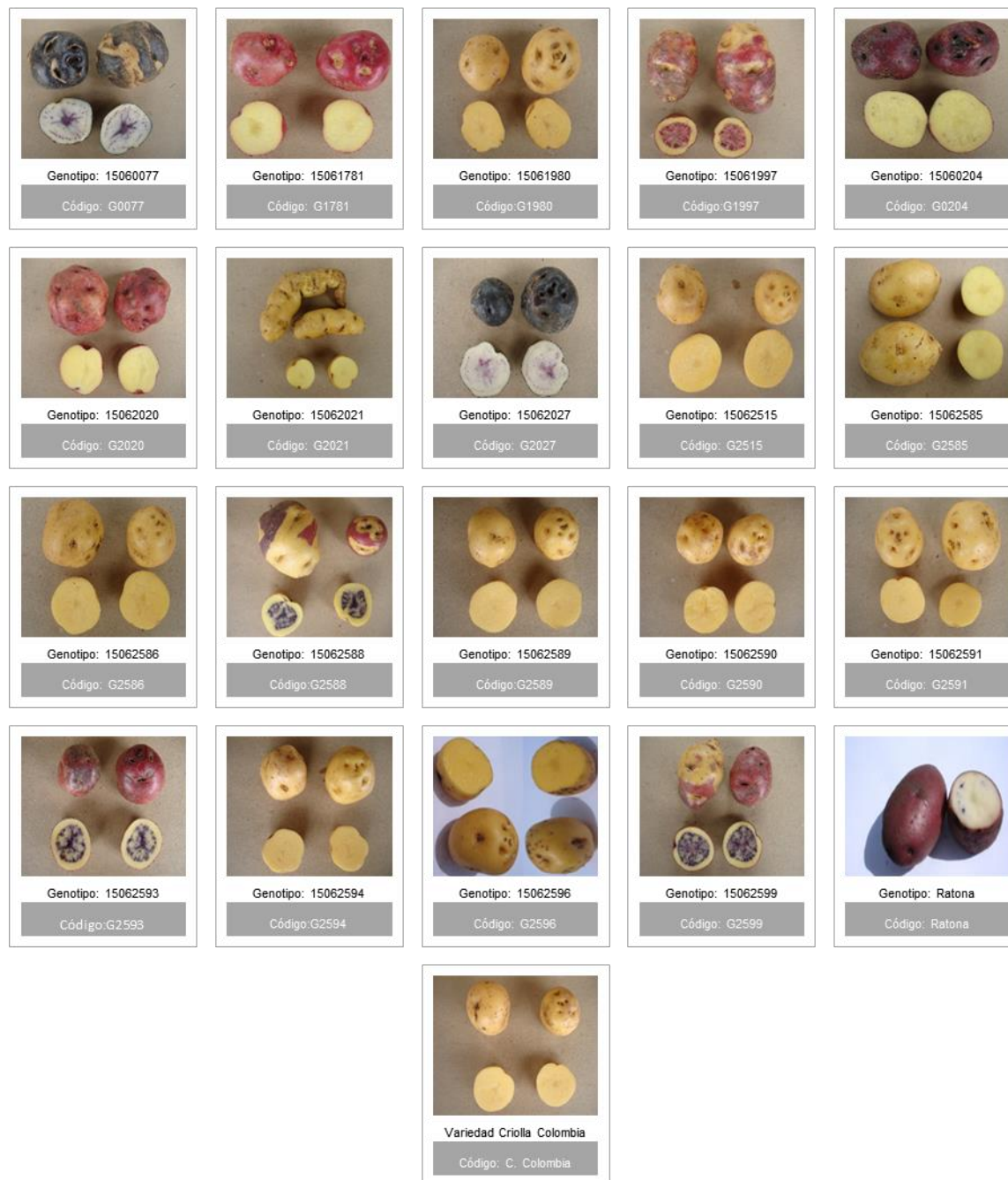
### 4.2.3 Preparación de las muestras y análisis

A la culminación del ciclo de cultivo entre 110 a 119 días se cosecharon los tubérculos, acorde al período vegetativo de cada uno de los genotipos de papa diploide evaluados. Para las muestras crudas y cocidas, los tubérculos cosechados se llevaron a laboratorio y se lavaron con agua destilada.

Los análisis fisicoquímicos de humedad, materia seca, proteínas, azúcares reductores, azúcares totales, almidón y cenizas, se realizaron en el Laboratorio de Química de la Universidad de La Salle. Para las muestras, se tomaron 100 g de tubérculos los cuales se licuaron y del triturado homogenizado se tomó la cantidad requerida para cada determinación fisicoquímica y los métodos empleados se observan en la Tabla 41.

**Tabla 41.** Métodos para las determinaciones fisicoquímicas

Análisis	Método	Referencia
Humedad y materia seca	925.10	AOAC, 2005a
Proteínas	935.11	AOAC, 2005b
Azúcares reductores	DNS (ácido 3,5 dinitrosalicílico)	Miller, 1959
Azúcares totales	Método indirecto	Universidad de La Salle, 2018
Almidones	Método indirecto	Universidad de La Salle, 2018
Cenizas	940.26	AOAC, 2005c



**Figura 13.** Genotipos de papa diploide evaluados para determinar composición fisicoquímica

#### 4.2.4 Valoración de la ingesta

Con los resultados de la caracterización fisicoquímica de los genotipos de papa diploide, se valoró la ingesta de energía con los macronutrientes proteína y carbohidratos

aplicando los factores de conversión de energía metabolizada o factores generales de Atwater (ICBF, 2018); y la grasa no se incluyó debido a que el ICBF (2018) reporta datos de grasa o lípidos para la variedad Criolla Colombia cruda con y sin piel con valores de 0,1 y 0,4 g/100 g de peso fresco (Tabla 1), por lo tanto, al no considerarlos en los cálculos no se afectan estos por su contenido bajo de grasa en la papa diploide.

Para los cálculos, los azúcares totales (reductores y no reductores) se asumieron como carbohidratos y la fibra dietaría no se consideró, aunque hace parte de los carbohidratos, debido a que el ICBF (2018) registra para la variedad Criolla Colombia cruda sin piel y con piel valores de fibra dietaría de 0,4 y 0,6 g/100 g de peso fresco (Tabla 1); por consiguiente, son valores pequeños que no afectan los cálculos de ingesta. En cuanto a los cálculos de ingesta de nutrientes para los genotipos de papa diploide, se realizaron con contenidos de proteínas y de carbohidratos de muestras crudas en base húmeda y de vitamina C de muestras cocidas en base seca, la cual se determinó según el método de Shakya y Navarre (2006) descrito en el numeral 2.2.6.

#### **4.2.5 Análisis estadístico**

Para establecer el efecto de los genotipos evaluados sobre las variables consideradas, se realizaron los análisis de varianza, previo cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuales. Estos análisis fueron complementados con pruebas de comparación múltiple de Tukey ( $P \leq 0,05$ ). Los procedimientos estadísticos fueron realizados mediante el programa SAS/STAT - Statistical Analysis versión 9.3 (SAS Institute Inc, 2011).

### **4.3 Resultados y discusión**

#### **4.3.1 Composición fisicoquímica**

La Tabla 42 exhibe el análisis descriptivo de los resultados de la caracterización fisicoquímica de los 21 genotipos de papa diploide establecidos en un ensayo de campo con tres repeticiones. Se presentan las medias, los máximos y los mínimos por cada variable determinada. A la vez, se resalta que hubo desviaciones estándar bajas, indicando poca dispersión de los datos obtenidos respecto a la media o cercanos a la misma.

**Tabla 42.** Análisis descriptivo de variables fisicoquímicas evaluadas en 21 genotipos de papa diploide evaluados y cultivados en el municipio de El Rosal

	Materia seca (%)	Almidón (%) BH	Proteína (%) BH	Proteína (%) BS	Cenizas (%) BH	Azúcares Totales (%) BH	Azúcares Reductores (%) BH
Media	25,20	18,43	2,23	8,74	1,38	20,42	1,98
Máxima	27,94	22,40	2,81	11,38	2,56	23,69	3,80
Mínima	22,75	14,44	1,73	6,95	0,96	16,38	0,88
Desviación estándar	0,984	0,95	0,275	0,275	0,27	0,922	0,232
Coefficiente de variación	3,904	5,15	12,306	3,15	19,46	4,519	11,72

En la Tabla 43 se muestran los cuadrados medios del análisis de varianza para las variables fisicoquímicas determinadas en los 21 genotipos de papa diploide (incluido el testigo) en muestras crudas, los que mostraron diferencias altamente significativas ( $P > 0,0001$ ) excepto en proteínas, lo que demuestra la variación de los genotipos evaluados.

**Tabla 43.** Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables fisicoquímicas en 21 genotipos de papa diploide evaluados y cultivados en el municipio de El Rosal

Fuente de variación	GL <sup>1</sup>	Materia seca	Proteína	Almidón	Humedad	Cenizas	Azúcares Totales	Azúcares Reductores
Bloque	2	1,713 <sup>ns</sup>	0,071 <sup>ns</sup>	0,078 <sup>ns</sup>	1,713 <sup>ns</sup>	0,094 <sup>ns</sup>	0,355 <sup>ns</sup>	0,112 <sup>ns</sup>
Genotipos	20	6,453 <sup>**</sup>	0,233 <sup>ns</sup>	10,71 <sup>**</sup>	6,453 <sup>**</sup>	0,502 <sup>**</sup>	8,371 <sup>**</sup>	1,835 <sup>**</sup>
Error	40	1,578	0,138	2,168	1,578	0,12	2,009	0,098
Coefficiente de variación (C.V.) (%)		4,99	16,64	7,99	1,68	25,12	6,94	15,79

Nota. <sup>1</sup>GL= Grados de libertad, \*=Diferencias estadísticas significativas ( $P \leq 0,05$ ), ns= no significativo, \*\*= Diferencias altamente significativas ( $P \leq 0,01$ ).

En la Tabla 44 se presentan los resultados de la comparación de medias para las variables fisicoquímicas evaluadas. El rango en materia seca (MS) osciló entre 22,76%  $\pm$  0,77 y 27,94%  $\pm$  1,12. Los genotipos G2589, G2585 y G1997, presentaron los mayores porcentajes de MS y fueron superiores a los genotipos G0204, G2599 y G1781 e iguales a los restantes genotipos (Tabla 44). Un alto contenido de MS es deseable en el procesamiento de papas fritas, ya que se economiza aceite en el proceso (Loyola et al., 2010). Seminario-Cunya et al. (2018) evaluaron 15 genotipos del Grupo Phureja y

obtuvieron contenidos de MS en un rango de 20,0 a 28,4% lo que concuerda con los genotipos evaluados en este estudio.

**Tabla 44.** Comparación de medias de las variables fisicoquímicas de 21 genotipos de papa diploide evaluados en el municipio de El Rosal del departamento de Cundinamarca

Genotipos	Materia Seca (%)	Almidón BH (%)	Proteínas BH (%)	Proteínas BS (%)	Cenizas BH (%)	Azúcares Totales BH (%)	Azúcares Reductores BH (%)
G2589	* 27,94 ± 1,12 a	22,4 ± 1,0 a	2,05 ± 0,06 a	7,35 ± 0,06 a	1,1 ± 0,14 bc	23,67 ± 0,95 a	1,27 ± 0,12 ghi
G2585	27,55 ± 0,82 a	17,64 ± 2,9 bcd	2,15 ± 0,37 a	7,80 ± 0,37 a	1,32 ± 0,2 bc	19,52 ± 2,3 a-d	1,88 ± 0,6 d-g
G1997	27,30 ± 0,94 a	19,85 ± 0,08 ab	2,33 ± 0,12 a	8,41 ± 0,12 a	1,03 ± 0,0 bc	22,25 ± 0,21 ab	2,40 ± 0,29 cde
G2591	26,64 ± 1,01 ab	20,30 ± 1,0 ab	2,04 ± 0,67 a	7,66 ± 0,67 a	1,95 ± 0,46 abc	21,17 ± 0,63 abc	0,88 ± 0,26 hi
G2594	26,48 ± 1,38 ab	19,65 ± 0,35 abc	2,25 ± 0,53 a	8,5 ± 0,53 a	1,57 ± 0,62 abc	20,65 ± 0,54 a-d	0,98 ± 0,74 hi
G2515	25,89 ± 0,0 ab	16,69 ± 0,0 bcd	2,70 ± 0,0 a	10,44 ± 0,0 a	1,05 ± 0,0 bc	18,68 ± 0,0 bcd	1,99 ± 0,0 c-g
G1989	25,80 ± 0,0 ab	19,74 ± 0,0 ab	2,61 ± 0,0 a	10,12 ± 0,0 a	1,34 ± 0,0 bc	21,69 ± 0,0 abc	1,95 ± 0,0 c-h
Criolla Colombia	25,67 ± 2,45 ab	20,40 ± 0,07 ab	2,25 ± 0,20 a	8,75 ± 0,20 a	1,32 ± 0,22 bc	21,77 ± 0,57 abc	1,40 ± 0,50 f-i
G1980	25,65 ± 1,16 ab	19,23 ± 0,95 abc	2,15 ± 0,28 a	8,39 ± 0,28 a	1,27 ± 0,20 bc	20,61 ± 1,03 a-d	1,38 ± 0,14 f-i
G2596	25,20 ± 1,70 ab	19,64 ± 3,35 abc	1,92 ± 0,45 a	7,62 ± 0,45 a	1,19 ± 0,56 bc	21,09 ± 3,46 abc	1,44 ± 0,19 e-i
G2588	25,17 ± 0,47 ab	17,78 ± 0,47 bcd	2,36 ± 0,51 a	9,38 ± 0,51 a	2,05 ± 0,16 ab	19,71 ± 0,38 a-d	1,93 ± 0,11 c-h
G2027	24,91 ± 1,07 ab	17,36 ± 0,36 bcd	1,73 ± 0,19 a	6,95 ± 0,19 a	1,05 ± 0,0 bc	20,26 ± 0,06 a-d	2,90 ± 0,3 abc
G2020	24,76 ± 0,42 ab	20,24 ± 0,96 ab	2,35 ± 0,33 a	9,48 ± 0,33 a	1,21 ± 0,44 bc	22,21 ± 0,74 ab	1,97 ± 0,22 c-g
G2593	24,69 ± 4,09 ab	18,26 ± 3,63 a-d	2,81 ± 1,18 a	11,38 ± 1,18 a	1,07 ± 0,16 bc	20,77 ± 3,30 a-d	2,51 ± 0,33 bcd
G2586	24,42 ± 0,81 ab	18,53 ± 0,81 a-d	2,04 ± 0,19 a	8,17 ± 0,19 a	1,67 ± 1,01 abc	19,69 ± 0,66 a-d	1,15 ± 0,14 ghi
G0077	24,34 ± 1,17 ab	16,77 ± 0,59 bcd	1,94 ± 0,11 a	7,97 ± 0,11 a	1,1 ± 0,21 bc	19,61 ± 0,45 a-d	2,83 ± 0,14 a-d
G2590	24,08 ± 0,38 ab	18,12 ± 0,85 a-d	1,91 ± 0,11 a	7,94 ± 0,11 a	1,34 ± 0,44 bc	19,51 ± 1,09 a-d	1,38 ± 0,24 f-i
G2021	24,05 ± 0,11 ab	16,92 ± 0,26 bcd	2,18 ± 0,22 a	9,06 ± 0,22 a	0,96 ± 0,08 bc	20,31 ± 0,40 a-d	3,40 ± 0,14 ab
G0204	22,95 ± 0,79 b	14,44 ± 1,40 d	2,58 ± 0,05 a	11,19 ± 0,05 a	1,11 ± 0,11 bc	16,38 ± 1,59 cd	1,94 ± 0,19 c-h
G2599	22,93 ± 0,0 b	18,08 ± 0,0 a-d	2,41 ± 0,0 a	7,33 ± 0,0 a	2,56 ± 0,0 a	21,88 ± 0,0 ab	3,80 ± 0,0 a
G1781	22,75 ± 0,77 b	15,07 ± 0,90 cd	2,21 ± 0,21 a	9,69 ± 0,21 a	1,77 ± 0,64 abc	17,39 ± 1,02 cd	2,33 ± 0,24 c-f

Nota. \*Resultados expresados en porcentaje ± SD y las letras diferentes demuestran diferencias significativas, Tukey (P<0,05).  
BH: base húmeda; BS: base seca.

El almidón presentó un rango de 14,44 ± 1,40 a 22,40% ± 1,0 en base húmeda (BH) y se destacaron los genotipos G2589, Criolla Colombia, G2591 y G2020, que tuvieron valores mayores a 20% (Tabla 44), lo que los convierte en potenciales para la obtención de almidones nativos como materia prima en diversos productos alimenticios. Lo opuesto ocurrió con los genotipos G0204, G1781, G0077 y G2021, que presentaron 14,4 a 16,9% de almidón (Tabla 44). Estudios reportados por Ngobese et al. (2017), confirman la variación en el contenido de almidones al estudiar ocho cultivares de *S. tuberosum* sembrados en Sudáfrica; las variedades Navigator e Innovator obtuvieron el valor más alto en su orden 18,1 y 17,9%, que los demás cultivares (13,7 y 15,4%).

Las proteínas en BH mostraron un rango entre  $1,73\% \pm 0,19$  y  $2,81\% \pm 1,18$  y en base seca (BS) de  $6,95\% \pm 0,19$  a  $11,38\% \pm 1,18$ , sin presentar diferencias entre genotipos (Tablas 43 y 44). Garnica et al. (2022) reportaron valores cercanos de contenido de proteína de 0,75 a 2,46% en BH para 5 variedades registradas de papa diploide evaluadas en 4 municipios del departamento de Nariño y 4 municipios del departamento de Cundinamarca, Colombia; la dispersión de dichos valores fue debido a la interacción genotipo por ambiente donde se establecieron los cultivos. El alto consumo del tubérculo de papa en la población altoandina incide favorablemente en la ingesta de proteínas en la dieta y, aunque la papa no es una fuente abundante en proteínas, si aporta la mayoría de los aminoácidos esenciales como: isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina y valina (Ježek et al., 2011).

El rango de la variable cenizas en BH osciló entre  $0,96 \pm 0,08$  y  $2,56\% \pm 0,00$  (Tabla 44). El genotipo G2599 con 2,56% presentó el mayor valor y por debajo estuvieron los genotipos G2588, G2591, G2594, G2586 y G1781 con porcentajes entre 1,77 y 2,05%. El genotipo testigo Criolla Colombia tuvo 1,32%. Al respecto, Peña et al. (2015) estudiaron genotipos de papa diploide cultivados en el departamento de Nariño, Colombia, y determinaron valoraciones de cenizas desde 0,7 a 1,1 g/100 g peso fresco, resultados menores a los encontrados en este estudio. La variación de los genotipos evaluados evidenció un amplio rango en el contenido de minerales, explicado en parte por las condiciones del suelo y las características genéticas de fijación de micronutrientes de cada genotipo.

Los genotipos evaluados presentaron diferencias en el contenido de azúcares totales en BH. El genotipo G2589 obtuvo el mayor promedio con  $23,67\% \pm 0,95$  y el menor valor lo obtuvo el genotipo G0204 con  $16,38\% \pm 1,59$ . El menor porcentaje de azúcares reductores se consiguió en los genotipos G2591 y G2594 con  $0,88 \pm 0,26$  y  $0,98\% \pm 0,74$  en su orden (Tabla 44) y el genotipo G2599 mostró mayor contenido de azúcares reductores con  $3,8\% \pm 0,00$ . Esta última variable es importante determinarla para la utilización de los tubérculos en procesos de postcosecha como fritura. Garnica et al. (2022) reportaron un rango de 0,043 a 0,345% en BH de azúcares reductores para 5 variedades registradas de papa diploide, demostrando que dichas variedades presentan un alto contenido de almidón en la materia seca para su aprovechamiento agroindustrial, debido a su relación inversa entre los azúcares reductores y el almidón.

### 4.3.2 Aportes a la ingesta de energía y nutrientes

La Resolución 3803 de 2016 expedida por el Ministerio de Salud y Protección Social presenta las Recomendaciones de Ingesta de Energía y Nutrientes a partir de la cantidad de las calorías y de los nutrientes que debe ingerir la población colombiana según el sexo, la edad y la actividad física para tener un estado óptimo de salud y bienestar (Ministerio de Salud y Protección Social, 2016).

Para los genotipos de papa diploide evaluados el aporte a la ingesta de energía se observa en la Tabla 45, a partir de su contenido de los macronutrientes: proteína y carbohidratos. Los genotipos G2589, G1997, G2020 y G1989 cuantificaron los mayores aportes a la ingesta de energía con valores entre un rango de 97,20 a 102,88 kcal; valores superiores a lo reportado en la tabla de composición de alimentos colombianos, en la cual la variedad Criolla Colombia que es la reportada, registra 96 kcal con piel en muestra cruda (ICBF, 2018).

En la Tabla 45 se presentan los aportes de energía de 100 g de cada genotipo evaluado según las recomendaciones de ingesta de energía para niños y niñas de 15 años, hombres y mujeres de 30 a 59 años con actividad física moderada (Ministerio de Salud y Protección Social, 2016). De la ingesta diaria de energía requerida, los genotipos diploides evaluados aportan para niños y niñas un rango de 2,53 a 4,20%; para hombres de 2,66 a 3,49%; y para mujeres de 3,03 a 4,12%. En el caso de que se incremente la ingesta de papa diploide, se aumenta el aporte de energía a la dieta diaria.

Suárez-Hernández et al. (2004) evaluaron la variedad Cara de papa tetraploide y obtuvieron resultados de composición fisicoquímica de almidón (11,11 g/100 g PF), proteína (2,29 g/100 g PF), vitamina C (19,57 g/100 g PF), entre otros; y para diferentes preparaciones culinarias encontraron que esta variedad aporta a la ingesta de energía: 173 kcal/100 g papa frita; 52,7 kcal/100 g papa cocida en agua; 50,8 kcal/100 g papa arrugada y 51,7 kcal/100 g papa asada. Estos autores resaltan que dependiendo del método de cocción los nutrientes varían para la ingesta final del consumidor. No obstante, consiguieron valores menores de ingesta de energía a los que se lograron con los genotipos de papa diploide de este estudio (Tabla 45).

**Tabla 45.** Aporte a la ingesta de energía de 100 g de genotipos de papa diploide evaluados en el municipio de El Rosal

Genotipos	Proteína* (g) BH	Carbohi- dratos (g) BH	Energía (kcal)	Recomendaciones de ingesta de energía**			
				Niños 15 años 3000 kcal/día	Niñas 15 años 2450 kcal/día	Hombres 30-59 años (70kg) 2950 kcal/día	Mujeres 30-59 años (70kg) 2500 kcal/día
				Aporte de energía (%)			
G2589	2,05	23,67	102,88	3,43	4,20	3,49	4,12
G2585	2,15	19,52	86,68	2,89	3,54	2,94	3,47
G1997	2,33	22,25	98,32	3,28	4,01	3,33	3,93
G2591	2,04	21,17	92,84	3,09	3,79	3,15	3,71
G2594	2,25	20,65	91,60	3,05	3,74	3,11	3,66
G2515	2,70	18,68	85,52	2,85	3,49	2,90	3,42
G1989	2,61	21,69	97,20	3,24	3,97	3,29	3,89
Criolla Colombia	2,25	21,77	96,08	3,20	3,92	3,26	3,84
G1980	2,15	20,61	91,04	3,03	3,72	3,09	3,64
G2596	1,92	21,09	92,04	3,07	3,76	3,12	3,68
G2588	2,36	19,71	88,28	2,94	3,60	2,99	3,53
G2027	1,73	20,26	87,96	2,93	3,59	2,98	3,52
G2020	2,35	22,21	98,24	3,27	4,01	3,33	3,93
G2593	2,81	20,77	94,32	3,14	3,85	3,20	3,77
G2586	2,04	19,69	86,92	2,90	3,55	2,95	3,48
G0077	1,94	19,61	86,20	2,87	3,52	2,92	3,45
G2590	1,91	19,51	85,68	2,86	3,50	2,90	3,43
G2021	2,18	20,31	89,96	3,00	3,67	3,05	3,60
G0204	2,58	16,38	75,84	2,53	3,10	2,57	3,03
G2599	2,41	21,88	97,16	3,24	3,97	3,29	3,89
G1781	2,21	17,39	78,40	2,61	3,20	2,66	3,14

Nota. \* Los valores corresponden a los de la Tabla 43 y para esta Tabla se expresan en gramos (g) contenidos en 100 g de tubérculo fresco.

\*\* Valores de recomendaciones de ingesta de energía según la Resolución 3803 de 2016 expedida por el Ministerio de Salud y Protección Social. Colombia.

Con respecto a la ingesta de proteína y de carbohidratos, la Resolución 3803 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2016) establece recomendaciones de ingesta por edades, géneros y pesos de personas; por esto, en la Tabla 46 se muestra el aporte de proteína y de carbohidratos de los genotipos evaluados en el municipio de El Rosal para niños y niñas de 13 años con 40 kg de peso, hombres y mujeres entre 30 y 59 años con 70 kg de peso. Esta muestra de población colombiana son consumidores habituales de papa diploide.

**Tabla 46.** Aporte a la ingesta de proteína y de carbohidratos de 100 g de genotipos de papa diploide evaluados en el municipio de El Rosal

Genotipos	Proteína* (g) BH	Recomendaciones de ingesta de proteína***		Carbohidratos (g) BH	Recomendaciones de ingesta de carbohidratos**	
		Niño-Niña 13 años (40kg) 1,32 g/kg/día	Hombre-Mujer 30-59 años (70kg) 1,11 g/kg/día		Niño-Niña 13 años (40kg) 130 g/día	Hombre-Mujer 30-59 años (70kg) 130 g/día
		Aporte de proteína (%)			Aporte de carbohidrato (%)	
G2589	2,05	3,88	2,64	23,67	18,21	18,21
G2585	2,15	4,07	2,77	19,52	15,02	15,02
G1997	2,33	4,41	3,00	22,25	17,12	17,12
G2591	2,04	3,86	2,63	21,17	16,28	16,28
G2594	2,25	4,26	2,90	20,65	15,88	15,88
G2515	2,70	5,11	3,47	18,68	14,37	14,37
G1989	2,61	4,94	3,36	21,69	16,68	16,68
Criolla Colombia	2,25	4,26	2,90	21,77	16,75	16,75
G1980	2,15	4,07	2,77	20,61	15,85	15,85
G2596	1,92	3,64	2,47	21,09	16,22	16,22
G2588	2,36	4,47	3,04	19,71	15,16	15,16
G2027	1,73	3,28	2,23	20,26	15,58	15,58
G2020	2,35	4,45	3,02	22,21	17,08	17,08
G2593	2,81	5,32	3,62	20,77	15,98	15,98
G2586	2,04	3,86	2,63	19,69	15,15	15,15
G0077	1,94	3,67	2,50	19,61	15,08	15,08
G2590	1,91	3,62	2,46	19,51	15,01	15,01
G2021	2,18	4,13	2,81	20,31	15,62	15,62
G0204	2,58	4,89	3,32	16,38	12,60	12,60
G2599	2,41	4,56	3,10	21,88	16,83	16,83
G1781	2,21	4,19	2,84	17,39	13,38	13,38

Nota. \* Los valores corresponden a los de la Tabla 43 y para esta Tabla se expresan en gramos (g) contenidos en 100 g de tubérculo fresco.

\*\* Valores de recomendaciones de ingesta de proteína y de carbohidratos según la Resolución 3803 de 2016 expedida por el Ministerio de Salud y Protección Social. Colombia.

Los genotipos G2589, G2515, G1989 y G2586 aportarían en proteína un rango entre 3,28 a 5,32% y en carbohidratos desde 13,38 a 18,21% para la ingesta diaria en niños y niñas. Para hombres y mujeres se les aportaría entre 2,23 a 3,62% de proteína y entre 13,38 a 18,21% de carbohidratos. Peña-Melo (2015) encontró que, en 110 g de papa diploide cocida, el aporte de proteína en la ingesta era hasta de 4,9% para una persona adulta del requerimiento diario en una dieta de 2000 kcal/día; pero en este estudio, se obtuvo que en 100 g de papa diploide cocida para mujeres con una ingesta de 2500 kcal/día se obtiene un aporte de proteínas hasta 3,62%.

En cuanto a la vitamina C en muestras cocidas de los genotipos de papa diploide, los aportes de su ingesta para niños y niñas de 13 años, hombres y mujeres de 30 a 59 años se presentan en la Tabla 47, según las recomendaciones diarias para la población colombiana (Ministerio de Salud y Protección Social, 2016). Los genotipos G2585, G2588 y G2020 exhiben el aporte más alto de vitamina C para niños y niñas con valores de 22,27; 20,56 y 20,38%; para hombres 11,13; 10,28 y 10,19%; y para mujeres 13,36; 12,33 y 12,23%, respectivamente.

Adicionalmente, menciona Burgos et al. (2009) que la ingesta de vitamina C o ácido ascórbico se recomienda para reducir el riesgo de enfermedades y se plantea su consumo en dosis diarias según las edades de las personas y por esto, es importante determinar este nutriente en tubérculos de papas andinas cultivadas en diferentes ambientes y el efecto que presentan los diversos métodos de cocción.

Love y Pavek (2008) resaltaron el tubérculo de papa como una primera fuente de vitamina C a nivel mundial y que puede contribuir con un 20% del consumo dietético en Europa. Además, esta vitamina está disponible en las diferentes preparaciones gastronómicas para el beneficio de la nutrición humana. Estos autores enfatizan que el contenido de vitamina C en la papa se lograría aumentar mediante: mejoramiento genético, manejo mejorado del cultivo y modificación del proceso de cocción para evitar pérdidas de esta vitamina termolábil.

**Tabla 47.** Aporte a la ingesta de vitamina C de 100 g de materia seca de tubérculos cocidos de los genotipos de papa diploide evaluados en el municipio de El Rosal

Genotipos	Vitamina C (mg/100g BS)	Retención vitamina C (%)	Recomendaciones de ingesta de vitamina C*		
			Niños (as) 13 años (40kg) 45 mg/día	Hombres 30-59 años (70kg) 90 mg/día	Mujeres 30-59 años (70kg) 75 mg/día
Aporte de vitamina C (%)					
G2515	4,69±0,57	31,20	10,42	5,21	6,25
G2589	5,60±0,29	41,42	12,44	6,22	7,47
Criolla Colombia	5,62±0,59	32,32	12,49	6,24	7,49
G2599	5,83±0,97	35,29	12,96	6,48	7,77
G2591	6,06±0,15	47,16	13,47	6,73	8,08
G0204	6,21±0,71	35,36	13,80	6,90	8,28
G1997	6,28±0,58	47,08	13,96	6,98	8,37
G1989	6,29±1,38	39,61	13,98	6,99	8,39
G1980	6,79±0,81	43,11	15,09	7,54	9,05
G0077	6,96±0,82	41,13	15,47	7,73	9,28
G2593	7,09±0,63	47,68	15,76	7,88	9,45
G2590	7,12±1,94	47,85	15,82	7,91	9,49
G1781	7,14±0,95	46,48	15,87	7,93	9,52
G2021	7,40±0,46	46,69	16,44	8,22	9,87
G2596	7,63±2,14	52,95	16,96	8,48	10,17
G2027	7,75±1,15	56,40	17,22	8,61	10,33
G2586	7,80±0,66	59,09	17,33	8,67	10,40
G2594	8,12±1,46	50,47	18,04	9,02	10,83
G2020	9,17±0,27	57,85	20,38	10,19	12,23
G2588	9,25±1,07	57,74	20,56	10,28	12,33
G2585	10,02±0,42	66,93	22,27	11,13	13,36

*Nota.* \*Valores de recomendaciones de ingesta de vitamina C según la Resolución 3803 de 2016 expedida por el Ministerio de Salud y Protección Social. Colombia.

## 4.4 Conclusiones

Los genotipos de papa diploide evaluados contienen ácido ascórbico como compuesto antioxidante y, también contenidos superiores de proteínas, almidón, azúcares y minerales, que aportan para el balance de una buena dieta.

Se identificaron genotipos de alta calidad nutricional, ellos fueron: G2021, G0204, G0077, G2027 y G2589. Estos materiales pueden ser utilizados como parentales para un potencial programa de mejoramiento genético de papa diploide por calidad nutricional o,

para recomendarlos al sistema productivo de comunidades de la zona alto andina colombiana.

El proceso de cocción de tubérculos de los genotipos diploides mostró variación en el porcentaje de retención de la vitamina C, en un rango de 31,20% (G2515) y 66,93% (G2585). El genotipo G2585 se destacó en el contenido de vitamina C en muestra cocida con  $10,02 \pm 0,42$  mg ácido ascórbico/100 g BS.

Bajo las condiciones del ambiente Rosal\_B, el genotipo G2589 sobresalió con mayores aportes a la ingesta de energía de 102,88 kcal y de carbohidratos con 18,21% a la dieta diaria recomendada de 130 g/día de carbohidratos para la población colombiana. El genotipo G2593 cuantificó el valor más alto de aportes a la ingesta de proteína con 5,32%. Los genotipos G2588 y G2585 en muestras cocidas resaltaron por sus mayores a la ingesta de vitamina C hasta 22,27% de los requerimientos diarios de 45 mg/día para la población colombiana de niños de 13 años.

## 4.5 Bibliografía

- Akyol, H., Riciputi, Y., Capanoglu, E., Caboni, M.F., Verardo, V. (2016). Phenolic Compounds in the Potato and Its Byproducts: An Overview. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(6), 835. <https://doi.org/10.3390/ijms17060835>
- Association of Official Analytical Collaboration [AOAC] International. (2005a). *AOAC 925.10 Official methods of analysis. Solids (total) and moisture in flour*. AOAC International.
- Association of Official Analytical Collaboration [AOAC] International. (2005b). *AOAC 935.11 Official methods of analysis. Protein in animal feed*. AOAC International.
- Association of Official Analytical Collaboration [AOAC] International. (2005c). *AOAC 940.26 Official methods of analysis. Ash of fruits and fruit products*. AOAC International.
- Burgos, G., Zum Felde, T., Andre, C., Kubow, S. (2020). The potato and its contribution to the human diet and health. En: Campos, H., Ortiz, O. (Eds) *The Potato Crop*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5_2)
- Burgos, G., Amoros, W., Salas, E., Muñoa, L., Sosa, P., Cayhualla, E., Sanchez, C., Díaz, C., Bonierbale, M. (2013). Total phenolic, total anthocyanin and phenolic

- acid concentrations and antioxidant activity of purple-fleshed potatoes as affected by boiling. *Journal of Food Composition and Analysis*, 30(1), 6–12.
- Burgos, G., Auqui, S., Amoros, W., Salas, E., Bonierbale, M. (2009). Ascorbic acid concentration of native Andean potato varieties as affected by 161esirée161ent, cooking and storage. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(6), 533-538. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.05.013>
- Espín, S., Villacrés, E., Brito, B. (2004). Caracterización Físico - Química, Nutricional y Funcional de Raíces y Tubérculos Andinos. En V. H. Barrera, C. Tapia y A. Monteros (Eds.), *Raíces y Tubérculos Andinos: Alternativas para la conservación y uso sostenible en el Ecuador*. INIAP, CIP, COSUDE. Ecuador. [https://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/06/RTAs\\_Ecuador\\_00.pdf](https://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/06/RTAs_Ecuador_00.pdf)
- Garnica, A. M., Prieto, L., Álvarez, C.P., Poveda, J.C., Cerón, M.S., Molina, Y. (2022). Análisis físico y nutricional de tubérculos de papa diploide (*Solanum phureja* Juz. et Buk.). En: M.S. Cerón, L. Prieto, A.M. Garnica y J. Gabriel Ortega (Eds.), *Papa Nativa Diploide, En Busca de Fortalecer el Sistema Productivo en Colombia* (pp. 357-390). Editorial Grupo Compás. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/38037>
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar [ICBF]. (2018). *Tabla de composición de alimentos colombianos*. Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF) y Universidad Nacional de Colombia. [https://www.icbf.gov.co/system/files/tcac\\_web.pdf](https://www.icbf.gov.co/system/files/tcac_web.pdf)
- Ježek, P., Hlušek, J., Lošák, T., Jůzl, M., Elzner, P., Kráčmar, S., Buňka, F., Mårtensson, A.M. (2011). Effect of foliar application of selenium on the content of selected amino acids in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.). *Plant soil and environment*, 57(7), 315–320. <https://doi.org/10.17221/57/2011-PSE>
- López-Cobo, A., Gómez-Caravaca, A. M., Cerretani, L., Segura-Carretero, A., Fernández-Gutiérrez, A. (2014). Distribution of phenolic compounds and other polar compounds in the tuber of *Solanum tuberosum* L. by HPLC-DAD-q-TOF and study of their antioxidant activity. *Journal of Food Composition Analysis*, 36, 1–11.
- Love, S.L., Pavek, J.J. (2008). Positioning the potato as a primary food source of vitamin C. *American Journal of Potato Research*, 85, 277–285. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9030-6>
- Loyola, N., Oyarce, E., Acuña, C. (2010). Evaluación del contenido de almidón en papas (*Solanum tuberosum* Cv. 161esirée), producidas en forma orgánica y

- convencional, en la provincia de Curicó, región del Maule. *Idesia (Arica)*, 28(2), 41-52. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292010000200005>
- Miller, G. (1959). Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3), 426–428.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2016). Resolución 3803 de 22 de agosto de 2016. Por la cual se establecen las Recomendaciones de Ingesta de Energía y Nutrientes- RIEN para la población colombiana y se dictan otras disposiciones. Colombia. [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%203803%20de%202016.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%203803%20de%202016.pdf)
- Ngobese, N., Workneh, T., Alimi, B., Tesfay, S. (2017). Nutrient composition and starch characteristics of eight European potato cultivars cultivated in South Africa. *Journal of Food Composition and Analysis*, 55. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.11.002>
- Peña, C., Restrepo-Sánchez, L.P., Kushalappa, A., Rodríguez-Molano, L.E., Mosquera, T., Narváez-Cuenca, C.E. (2015). Nutritional contents of advanced breeding clones of *Solanum tuberosum* Group Phureja, *LWT – Food Science and Technology*, 62(1), 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.038>
- Peña-Melo, C.B. (2015). *Evaluación del contenido nutricional y actividad antioxidante en Solanum tuberosum grupo Phureja*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54851>
- Porras, P.D., Herrera, C.A. (2015). Modelo productivo de la papa criolla para los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Mosquera, Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica]. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/13752>.
- Saldaña-Villota, T.M., Cotes-Torres, J.M. (2020). Functional growth analysis of diploid potato cultivars (*Solanum phureja* Juz. Et Buk.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 14(3), 402–415. <https://doi.org/10.17584/rcch.2020v14i3.10870>
- SAS Institute. (2004). Statistical Analysis System – SAS (Version 9.0) [Software]. Estados Unidos. [www.sas.com/en](http://www.sas.com/en)
- Seminario-Cunya, J.F., Villanueva-Guevara, R., y Valdez-Yopla, M.H. (2018). Rendimiento de cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) amarillos precoces del grupo Phureja. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 639-653. <https://dx.doi.org/10.15517/ma.v29i3.32623>

- Shakya, R., Navarre, D.A. (2006). Rapid screening of ascorbic acid, glycoalkaloids, and phenolics in potato using high-performance liquid chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 5253-5260. <https://doi.org/10.1021/jf0605300>
- Suárez-Hernández, P., Rodríguez-Rodríguez, E. M., Díaz-Romero, C. (2004). Cambios en el valor nutritivo de patatas durante distintos tratamientos culinarios. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 4(4), 257-261. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72440405>
- Universidad de La Salle. (2018). Método indirecto para la determinación de almidones a través de azúcares reductores en vegetales. Patente colombiana NC2018/0008702. 17/08/2018.
- Valbuena, R.I., Roveda, G., Bolaños, A., Zapata, J.L., Medina, C.I., Almanza, P.J., Porras, P.D. (2009). Escalas fenológicas de las variedades de papa parda pastusa, diacol capiro y criolla “yema de huevo” en las zonas productoras de Cundinamarca, Boyacá, Nariño Y Antioquia. Corpoica, Cevipapa, Fedepapa, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Colombia. [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12893/44240\\_56518.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12893/44240_56518.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Zaheer, K., M.H. Akhtar. (2016). Potato production, usage, nutrition-a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(5), 711-721. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.724479>
- Zapata, J.L., Navas, G.E., Tamayo, A.J., Díaz, C.A. (2006). *Manejo Agronómico de la Papa Criolla para el procesamiento Industrial (Boletín Técnico)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). <http://hdl.handle.net/20.500.12324/32759>



## 5. Conclusiones y recomendaciones generales

### 5.1 Conclusiones

#### ▪ Objetivo 1.

- Se encontró correlación significativa de la capacidad antioxidante por ABTS y de fenoles totales entre muestras cruda y cocida ( $r=0,88$  y  $r=0,82$  respectivamente), mientras que en vitamina C no se presentó correlación entre muestras crudas y cocidas, lo que sugiere que se requiere cuantificar esta vitamina en cada tipo de muestra.
- Las principales variables que contribuyeron positivamente a la expresión de la capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C en los genotipos evaluados fueron: grados días acumulados del ciclo del cultivo, temperatura media del ciclo del cultivo y temperatura mínima a 60 días antes de la cosecha; también, las variables de suelo zinc disponible y potasio intercambiable.
- Las características fisicoquímicas del suelo aluminio intercambiable, fósforo disponible y acidez, incidieron negativamente en la respuesta de las variables capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C.
- Los genotipos Chaucha Piña y G2020 sobresalieron en su respuesta fenotípica en las variables capacidad antioxidante y fenoles totales en muestras crudas y cocidas. El testigo comercial Criolla Colombia se destacó para vitamina C en muestra cruda. Los genotipos G2025, G1998 y G2010 exhibieron mayor porcentaje de retención (55 y 56%) de vitamina C en muestra cocida.

#### ▪ Objetivo 2.

- En todas las variables evaluadas se encontró efecto altamente significativo de la interacción genotipo por ambiente. El aporte de los ambientes a la interacción genotipo por ambiente fue diferente para capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C. Así mismo, el aporte sobre la interacción de los genotipos de papa diploide evaluados.

- Al analizar la estabilidad fenotípica se identificaron genotipos estables, inestable y de adaptación específica para capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C. Pocos genotipos fueron consistentes en su respuesta de estabilidad fenotípica entre muestras crudas y cocidas, excepto los genotipos Botella Roja y G2593 para capacidad antioxidante por ABTS; G2027 y G0077 para fenoles totales y Botella Roja para vitamina C.
- **Objetivo 3.**
  - El rendimiento de tubérculos de los genotipos evaluados estuvo entre 8629 a 27465 kg.ha<sup>-1</sup> (G2020 y G2588 respectivamente). El genotipo G1989 fue el de mayor estabilidad fenotípica y su rendimiento fue superior al promedio general de 17208 kg.ha<sup>-1</sup>.
  - En el análisis fisicoquímico realizado a los genotipos de papa diploide cosechados en el ambiente del Rosal\_B (alto estrés hídrico en la primera fase de crecimiento y desarrollo de las plantas) se obtuvieron valores de materia seca entre 22,75 a 27,94%; almidón entre 15,07 a 22,40% BH; proteína entre 7,33 a 11,38% BS y cenizas entre 0,96 a 2,56 % BH, evidenciando alta variación fenotípica para estas variables.
  - Al realizar la estimación de aportes de los genotipos estudiados sobre la ingesta de energía, sobresalió el genotipo G2589 (102,88 kcal) con un aporte en la ingesta de carbohidratos de 18,21% para una dieta diaria recomendada de 130 g/kcal/día para la población colombiana.
  - El genotipo G2593 cuantificó los valores más altos para los aportes a la ingesta de proteína (5,32%). En muestras cocidas los genotipos G2588 y G2585 sobresalieron por los aportes más altos a la ingesta de vitamina C, hasta 22,27%, según requerimientos de 45 mg/día para la población colombiana de niños.

## 5.2 Recomendaciones

- Complementar estudios sobre el efecto del potasio intercambiable del suelo para la variable de capacidad antioxidante por ABTS y fenoles totales. Así mismo, estudiar el efecto del hierro y zinc disponibles sobre la expresión de la vitamina C.

- Complementar estudios sobre los efectos negativos encontrados en este trabajo del aluminio intercambiable, fósforo disponible y acidez del suelo para las variables vitamina C, fenoles totales, capacidad antioxidante por ABTS y por FRAP.
- Ampliar estudios relacionados con las contribuciones de las variables climáticas y de las características fisicoquímicas del suelo orientados a potenciar la respuesta de los compuestos antioxidantes en genotipos de papa diploide seleccionados.



**A. Anexo. Matriz de correlación de  
Pearson de todas las variables en  
estudio para muestras crudas**





