

Fisiología vegetal

Artículo de investigación científica y tecnológica

Rendimiento y variables poscosecha de cultivares de papa del grupo Phureja en ambientes contrastantes por altitud de la región Andina central de Colombia

Yield and postharvest quality of potato cultivars of the Phureja Group in contrasting environments by altitude of the central Andean region of Colombia

 Pedro Alfonso Lizarazo Peña ^{1*}  Liz Patricia Moreno Fonseca ^{1*}
 Carlos Eduardo Nústez López ¹

¹ Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

*Autor de correspondencia: Universidad Nacional de Colombia, Cra 30 # 45 -03. Edificio: 500 (Facultad de Ciencias Agrarias), Bogotá, Colombia. palizarazop@unal.edu.co

Recibido: 28 de agosto de 2020
Aprobado: 02 de febrero de 2022
Publicado: 12 de mayo de 2022

Editor temático: Rafael Reyes Cuesta, (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA]), Bogotá, Colombia.

Para citar este artículo: Lizarazo-Peña, P., Moreno, L. P., & Nústez-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), e2197. DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2197

Resumen: Colombia presenta alta diversidad de genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum*, grupo Phureja), cultivados en un amplio rango altitudinal. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la altitud en el rendimiento y la calidad poscosecha de cultivares mejorados de papa del grupo Phureja. Para ello, se empleó un arreglo factorial completo en bloques generalizados, cuyo primer factor fue el cultivar (Criolla Colombia, Criolla Dorada, Criolla Ocarina, Paola y Violeta) y el segundo, la localidad con altitudes contrastantes (3.200, 2.700 y 2.300 m s.n.m.). Las variables de productividad evaluadas fueron rendimiento, porcentaje por categoría comercial y número de tubérculos, mientras que las de calidad fueron gravedad específica, respuesta a fritura y, para el cultivar violeta, pigmentación en tubérculo. Se presentaron diferencias significativas en todas las variables evaluadas, por la interacción de la localidad por cultivar. Criolla Dorada fue el cultivar más estable en rendimiento entre localidades. En la localidad baja, se afectó la productividad de los cultivares Criolla Ocarina, Paola y Violeta, a diferencia de localidades con mayor altitud, donde se favoreció el rendimiento y porcentaje de papa "categoría primera" en todos los cultivares. Una mayor altitud de la localidad favoreció el número de tubérculos por sitio en Criolla Ocarina, la gravedad específica en Criolla Dorada y la pigmentación en tubérculo de Violeta, pero afectó negativamente la fritura en todos los cultivares. Teniendo en cuenta que la altitud de siembra afectó todas las variables evaluadas con diferencias por cultivar, se debe considerar esta interacción al momento de establecer cultivos de papa del grupo Phureja.

Palabras clave: calidad para industria, interacción genotipo ambiente, gradiente de temperatura, papa diploide, productividad de la papa, temperatura ambiental del aire.

Abstract: Colombia has an important diversity of diploid potato genotypes (*Solanum tuberosum*, Phureja Group) cultivated in a wide altitudinal range. The goal of this research was to evaluate the effect of planting altitude in terms of yield and postharvest quality on improved potato cultivars of the Phureja Group. A complete factorial arrangement on generalized blocks was used. The first factor was the cultivar (Criolla Colombia, Criolla Dorada, Criolla Ocarina, Paola y Violeta), and the second one the locality with contrasting altitudes (3200, 2700 y 2300 m a.s.l.). Examined productivity variables were yield, percentage by commercial category and number of tubers, while the quality variables were specific gravity, response to frying and, for the violet cultivar, tuber pigmentation. Significant differences were found in all the variables evaluated, due to the interaction between locality and cultivar. Criolla Dorada was the most stable cultivar in yield between locations. In the lower locality, the productivity of the cultivars Criolla Ocarina, Paola and Violeta was affected, in contrast to localities with higher altitude, where the yield and percentage of "first category" potato was enhanced in all cultivars. Altitude enhanced the number of tubers per site in Criolla Ocarina, specific gravity in Criolla Dorada and pigmentation in Violeta tubers, but negatively affected frying in all cultivars. Considering that planting altitude affected all the variables evaluated with differences by cultivar, this interaction should be considered when establishing potato cultivars of the Phureja group.

Keywords: diploid potato, environmental air temperature, genotype environment interaction, potato productivity, quality for industrial use, temperature gradients.



Introducción

Colombia es el tercer productor de papa en Latinoamérica, luego de Perú y Brasil (Faostat, 2019), con un área sembrada de 125.000 hectáreas y una producción de 2.625.272 toneladas (Federación Colombiana de Productores de Papa [Fedepapa], 2020). La papa se reconoce como el cultivo más importante de clima frío para el país (Unidad de Planeación Rural Agropecuaria [UPRA], 2016) y un importante alimento en la canasta familiar, especialmente en familias de bajos ingresos. Se estima que el consumo per cápita es de 62 kg/año (UPRA, 2016), inferior al de otros países productores como Perú con 85 kg/año (Reategui et al., 2019). La distribución de las papas andinas está determinada por la altitud sobre el nivel del mar (Singh & Kaur, 2016) y en Colombia se cultiva en montañas y valles interandinos altos de las tres cordilleras (UPRA, 2016).

En la agricultura del trópico, la altitud es importante pues caracteriza ambientes, debido a su influencia sobre variables como la densidad del aire, la temperatura ambiental y la radiación, que afectan el desarrollo de cultivos (Fischer & Orduz, 2012; Ibáñez et al., 2017; Jaramillo-Robledo, 2005; Jing & Jichao, 2012; Rodríguez-Pérez, 2010; Willey, 2016). Diferentes estudios han evaluado la influencia del gradiente altitudinal en el rendimiento y la calidad en papa, como los realizados por Ibáñez et al. (2017), en cultivares nativos de *S. kurtzianum*; Kim et al. (2012), en los cultivares mejorados de *S. tuberosum* “Superior” y “Atlantic”, y Singh y Ahmed (2008), en los cultivares mejorados “Kufri Jyoti” y “Kufri Chandramukhi” de *S. tuberosum*. No obstante, para cultivares del grupo Phureja, no hay estudios que describan el comportamiento de los cultivares en gradientes altitudinales, pues generalmente las evaluaciones se han realizado en altitudes óptimas, con el fin de identificar su potencial productivo. El conocimiento en la respuesta de cultivares de papa del grupo Phureja a la altitud permitirá ajustar prácticas de manejo agronómico, seleccionar el mejor cultivar según las necesidades de mercado y potencializar el uso de nuevos cultivares mejorados.

Las papas del grupo Phureja son diploides y se caracterizan por un corto ciclo de cultivo, la ausencia de reposo en los tubérculos y su sensibilidad al fotoperiodo para tuberización (Huaman & Spooner, 2002; Rodríguez et al., 2009). El grupo Phureja es cultivado en altitudes entre los 2.200 y 3.200 m s.n.m. (Núñez, 2011), en Colombia, Ecuador y Venezuela (Ghislain et al., 2006), aunque existen reportes de cultivos en Bolivia y Centro América (Escallón et al., 2005). Colombia es el principal país productor y exportador en el mundo de papa del grupo Phureja, cuyos departamentos de Nariño y parte de Boyacá se reconocen como centro de diversidad de la especie (Gallón et al., 2019; Núñez, 2018; Rodríguez et al., 2009). En comparación con la papa tetraploide, el grupo Phureja es menos cultivado y productivo, pero esta diferencia en rendimiento se compensa con una alta calidad organoléptica, buena aceptación para consumo y, por lo general, un mayor precio de venta (Rojas & Seminario, 2014).

Las papas del grupo Phureja más reconocidas en Colombia son las de morfotipo redondo amarillo, denominado “yema de huevo” o “criolla” (Rodríguez et al., 2009). Esta última designación se ha mantenido en el nombre de los cultivares con este morfotipo, registrados por la Universidad Nacional de Colombia (UNC). La oferta de cultivares del grupo Phureja en Colombia incluye materiales con morfotipo “criolla” como Criolla Colombia, Criolla Latina, Criolla Paisa, registradas en 2005; Criolla Galeras, Criolla Guaneña, registradas en 2007; Criolla Suapa, Criolla Ocarina y Criolla Dorada, registradas en 2015, todas por el grupo de investigación en papa de la UNC (Núñez, 2018; Rodríguez et al., 2009). Otros cultivares con este morfotipo

“criolla” son Sol Andina, Tiba y Estrella, registrados en 2017 por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) (Alzate et al., 2017). En 2015, la UNC registró nuevos cultivares con fenotipos diversos en forma y color de tubérculo: Milagros, Paola, Paysandú, Primavera y Violeta (Ñústez, 2018).

El rendimiento ha sido el principal criterio para evaluar genotipos y prácticas de manejo (Haynes, 2001). No obstante, otras variables son importantes indicadores de la productividad como el número de tubérculos y la distribución del rendimiento por categoría (Navarre & Pavek, 2014), y se emplean comúnmente en investigaciones en papa (Escallón et al., 2005; Santos, 2010; Seminario-Cunyá et al., 2018). El tamaño del tubérculo cosechado influye en el precio de venta; por ejemplo, en el mercado fresco de “papa criolla” los tubérculos grandes tienen mayor precio (categorías cero y primera), mientras que para procesamiento (precocida congelada o encurtida) es deseable tubérculos más pequeños (categoría segunda y a veces tercera) y uniformes, debido a exigencias de los consumidores y a la necesidad de estandarización de procesos industriales (Herrera & Rodríguez, 2011; Rivera et al., 2011).

El rendimiento en papa depende del proceso de tuberización, que está regulado por interacciones entre factores ambientales, genéticos, bioquímicos y fisiológicos, como el desarrollo de meristemas, la partición de carbono y la transducción de señales (Ewing & Struik, 1992; Vreugdenhill & Struik, 1989; Zierer et al., 2021). El proceso de tuberización se divide en etapas (Gregory, 1965), que comienza con la inducción, generada por días cortos y bajas temperaturas que inducen la síntesis del señalizador “tuberígeno” que se trasloca a los estolones (Aksenova et al., 2012; Hannapel, 2007; Navarre & Pavek, 2014; Singh & Kaur, 2016; Zierer et al., 2021). Este estímulo desencadena una respuesta hormonal endógena (Aksenova et al., 2012; Navarre & Pavek, 2014) que detiene el crecimiento del estolón e induce la tuberización, proceso caracterizado por el hinchamiento de la parte subapical del estolón (Struik, 2007; Viola et al., 2001; Xu et al., 1998; Zierer et al., 2021). Posteriormente, se presenta la etapa de crecimiento o llenado del tubérculo, donde se genera una rápida división celular que finaliza con su maduración (Navarre & Pavek, 2014; Struik, 2007).

La papa procesada resulta en una alternativa de comercialización de alta importancia para los productores de esta especie, pues favorece su ingreso respecto al mercado tradicional (Herrera & Rodríguez, 2011). La materia seca en tubérculo expresada como porcentaje del peso fresco es una variable importante en procesos que implican deshidratación, como la fritura, la extracción de almidón y la producción de puré (Herrera & Rodríguez, 2011). La materia seca se puede evaluar de forma directa o indirecta a partir de la gravedad específica (GE) debido a la alta correlación que existe entre estas variables (Haynes, 2001; Manrique & Ñústez, 2014; Herrera & Rodríguez, 2011). Altos valores de GE son deseables en fritura, pues indican mayor contenido de sólidos en tubérculo y mejor rendimiento en peso de papa procesada, además de implicar menor gasto de aceite en la fritura y la producción de hojuelas más rígidas, crujientes y harinosas (Haynes, 2001; Manrique & Ñústez, 2014).

Otra variable importante en fritura es el pardeamiento de las hojuelas, que se relaciona con contenidos altos de azúcares reductores en el tubérculo, indeseables en el proceso (Navarre & Pavek, 2014; Rivera et al., 2011; Rodríguez & Herrera, 2011). En el proceso de fritura, la alta temperatura del aceite genera que los azúcares reductores se unan a aminoácidos libres y otros compuestos, causan oscurecimiento y un sabor amargo indeseable, proceso conocido como reacción de Maillard (Navarre & Pavek, 2014; Singh & Kaur, 2016), además de la formación de

compuestos nocivos para la salud humana como la acrilamida (Singh & Kaur, 2016). El contenido de antioxidantes es una variable de calidad que tiene cada vez mayor interés comercial, particularmente en mercados diferenciados y en la industria de alimentos con potencial nutracéutico (Reyes et al., 2004; Singh & Kaur, 2016). En papa del grupo Phureja, se han reportado altos niveles de antioxidantes en tubérculo, particularmente en cultivares con pigmentación morada o roja, respecto a los de amarilla o blanca (Benavides-Guerrero et al., 2020; López-Rodríguez & Núñez-López, 2020), así como el aumento de estos pigmentos por la altitud en otros cultivares de papa (Ibáñez et al., 2017; Reddivari et al., 2007; Reyes et al., 2004).

Teniendo en cuenta la amplitud en el rango altitudinal donde se cultiva papa del grupo Phureja en Colombia, así como la diversidad de cultivares registrados, esta investigación busca evaluar la respuesta del rendimiento y variables de calidad poscosecha de cultivares mejorados de papa del grupo Phureja, en ambientes contrastantes en altitud.

Materiales y métodos

Material vegetal y establecimiento del experimento

Se evaluaron cinco cultivares comerciales de papa del grupo Phureja registrados por el programa de mejoramiento genético de la UNC (tabla 1), cuatro de los cuales fueron registrados recientemente y cuentan con poca información, y el cultivar Criolla Colombia, de mayor importancia comercial para el país.

Tabla 1. Cultivares seleccionados para evaluación en este ensayo

Cultivar	Parentales	Adaptación en altitud (m s.n.m.)	Departamento de liberación	Año de registro
Criolla Dorada*	C. Guaneña × C. Galeras	2.500 – 3.200	Nariño	2015
Criolla Ocarina*	C. Galeras × C. Guaneña	2.500 – 3.200	Nariño	2015
Paola*	C. Paisa × <i>S. tuberosum</i> Grupo Phureja (Col-3)	2.400 – 2.800	Antioquia	2015
Violeta*	<i>S. tuberosum</i> Grupo Phureja (Col-66) × LP-Cal-10	2.400 – 2.800	Antioquia	2015
Criolla Colombia**	No conocidos	2.400 – 3.200	Antioquia, Cundinamarca, Boyacá y Nariño	2005

* Reporte de registro de cultivar (Núñez, 2010), ** (Núñez, 2011).

Fuente: Elaboración propia

El experimento se estableció a libre exposición en marzo del 2018, mes considerado adecuado para la siembra de papa en el centro del país (Vargas-Camacho et al., 2020). Se establecieron tres parcelas experimentales en localidades de la provincia del Sumapaz (Cundinamarca),

contrastantes en altitud y cercanas geográficamente (tabla 2). Los suelos de las localidades evaluadas están clasificados en unidades de los órdenes andisol e inceptisol (Instituto Colombiano de Geología y Minería [Ingeominas], 2004) que se muestran en la figura suplementaria 1. La localidad alta es una zona tradicional de producción de papa para semilla, mientras la localidad media y baja son zonas de producción de papa del grupo Phureja para consumo fresco.

Tabla 2. Ubicación y características de las localidades donde se realizó el ensayo

Municipio	Ubicación geográfica	Altitud (msnm)	T. med. (°C)	T. mín. (°C)	T. máx. (°C)	HR (%)
Sibaté Vda. Romeral	4°25'33.43"N 74°15'31.56"O	3200	10,1	7,0	15,6	87,5
Sibaté Vda. San Rafael	4°28'27.77"N 74°17'01.95"O	2700	12,5	9,1	17,3	90,7
Granada Vda. San Rainmundo	4°30'02.88"N 74°22'23.74"O	2320	15,4	13,1	18,4	95,0

Vda: Vereda; T. med.: Temperatura media; T. mín.: Temperatura mínima; T. máx: Temperatura máxima; HR: Humedad relativa promedio.

Fuente: Elaboración propia

Se empleó un diseño experimental bifactorial completo en bloques generalizados, con tres repeticiones. El primer factor fue el cultivar (C) con cinco niveles y el segundo, la localidad (L) con tres niveles. El factor de bloqueo (B) se tomó basado en la pendiente de la parcela. La unidad experimental correspondió a una parcela de 90 m² por cultivar dispuestas una contigua a la otra, a una densidad de plantación de 33.333 sitios por hectárea (1 m entre hileras y 0,3 m entre plantas). Por sitio de plantación se empleó un tubérculo en estado de brotación múltiple y tamaño homogéneo (20-25 g). Un mes previo a la siembra, se realizó preparación del terreno con arado de cincel y arado rotativo. Para la localidad alta se incorporó cal dolomita (1 t/ha), cuya dosis fue estimada a partir del método combinado descrito por Espinosa y Molina (1999), empleando los resultados de análisis de suelos (tabla 3). La fertilización se realizó al 100 % al momento de la plantación con 20 g de fertilizante granulado (15-15-15), distribuido en corona alrededor de cada tubérculo semilla. La dosis de fertilización empleada responde a ensayos realizados por los autores en los mismos cultivares, cuyos resultados aún no se han publicado. El manejo agronómico del cultivo se realizó de manera oportuna y técnica, empleando productos comerciales registrados para el cultivo de papa. La temperatura y la humedad relativa ambiental se midieron con estaciones climáticas U-metos 200 (Pessl Instruments, Weiz-Austria).

Tabla 3. Resumen de reporte de análisis de suelos para las tres localidades donde se realizó la evaluación de los cultivares de papa del grupo Phureja

Baja	Media	Alta
------	-------	------

Parámetro	(2.300 m s.n.m.)		(2.700 m s.n.m.)		(3.200 m s.n.m.)	
	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación
pH	5,46	Bajo	5,34	Bajo	5,00	Bajo
CE (dS m ⁻¹)	0,32	Adecuado	0,56	Adecuado	0,16	Adecuado
Carbono orgánico (%)	8,79	Medio	7,58	Medio	14,00	Alto
Materia orgánica (%)	15,14	Medio	13,06	Medio	24,11	Alto
Potasio*	0,51	Medio	0,93	Alto	0,60	Medio
Calcio*	8,53	Alto	12,00	Alto	6,20	Alto
Magnesio*	1,12	Medio	3,18	Alto	0,84	Bajo
Sodio*	0,09	Medio	0,23	Medio	0,25	Medio
Acidez*	0,62	Exceso	0,54	Alto	1,93	Exceso
Da (g cm ⁻³)	0,75	Baja	0,75	Baja	0,59	Baja
Textura	Franco-limoso		Franco-limoso		Franco-limoso	

Laboratorio de análisis Agrilab; Da: Densidad aparente; * Miliequivalentes por 100 g de suelo.

Fuente: Elaboración propia

Variables de productividad

El rendimiento (RT) se determinó al cosechar el total de plantas de cada parcela por cultivar y localidad. Los tubérculos se clasificaron en tres categorías por tamaño: la primera fue > 4 cm de diámetro; la segunda, de 2-4 cm de diámetro, y la tercera, < 2 cm de diámetro. Además, se pesaron en campo con una báscula de gancho (BPC100, Detecto, Bogotá) por categoría para establecer el porcentaje por categoría primera (PC1°), segunda (PC2°) y tercera (PC3°). El número de tubérculos por sitio (NT) se determinó por conteo de los tubérculos en cinco sitios de plantación al azar por parcela, excluyendo plantas de extremos de hilera o hileras de borde.

Variables de poscosecha

La gravedad específica (GE) se estimó con 500 g de tubérculos de categoría primera por repetición. Esta se determinó con la metodología de peso en aire y peso en agua descrita por Bonierbale et al. (2010). La respuesta de fritura (RF) se evaluó de una muestra al azar de seis tubérculos de categoría primera por repetición. Para tal fin, se cortaron de cuatro a seis hojuelas de 1 mm de espesor de la parte central de cada tubérculo con un procesador manual de alimentos (SL-02, Equiphotel, Bogotá). Las hojuelas se lavaron con agua del acueducto y se dejaron secar sobre papel absorbente. El proceso de fritura se realizó de acuerdo con la metodología reportada por Bonierbale et al. (2010). Las hojuelas fritas fueron fotografiadas (figuras suplementarias 2, 3 y 4). La calificación de RF fue realizada por dos evaluadores con la escala de pardeamiento de hojuelas (Bonierbale et al., 2010). En el cultivar Violeta se evaluó la pigmentación en carne de forma cualitativa, para lo cual se emplearon hojuelas crudas con características similares a las

utilizadas en RF. Las muestras se procesaron en la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNC, sede Bogotá.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con el paquete estadístico R (versión 3.5.1). Para todas las variables se realizó verificación de los supuestos de homocedasticidad y normalidad, para proceder con análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0,05$). Por su carácter ordinal, la variable RF no cumplió con el supuesto de normalidad; se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis (McCrum-Gardner, 2008) y comparaciones *post hoc* con el criterio de diferencia menos significativa de Fischer y el método de ajuste de Bonferroni de la librería “agricolae” (De Mendiburu, 2021). La variable de PC, por su carácter composicional, se analizó de forma descriptiva.

Resultados

Se presentaron diferencias significativas para todas las variables en el factor *localidad*, mientras que para el factor *cultivar* se presentaron solo en las variables RT, NT y GE. Todas las variables presentaron efectos significativos para la interacción cultivar por localidad (tabla 4).

Tabla 4. Resultados de significancia para los análisis de varianza (ANOVA) y del test de Kruskal Wallis en las variables evaluadas

Fuente de variación	Rendimiento	Número de tubérculos	Gravedad específica	Respuesta de fritura
Bloque (B)	ns	ns	ns	ns
Localidad (L)	***	***	**	***
Cultivar (C)	*	***	***	ns
Interacción L×C	*	***	*	*
Coefficiente de variación	30,3 %	34,4 %	11,1 %	46,2 %

*** $p \leq 0,01$ %; ** 1,0 %; * 5,0 %; ns: no significativa.

Fuente: Elaboración propia

La variable RT presentó diferencias por localidad: fue mayor en la localidad alta (31,3 t/ha), seguido por la media (22,9 t/ha) y la baja (17,9 t/ha) (figura 1a). Para el factor *cultivar*, el promedio del RT osciló entre 21,4 y 22,9 t/ha, y la significancia observada se explica por la diferencia entre Paola y Criolla Dorada, siendo superior la primera (figura 1b). A excepción de Criolla Dorada, en todos los cultivares aumentó el RT con la altitud con diferencias significativas entre las localidades alta y baja (figura 1c).

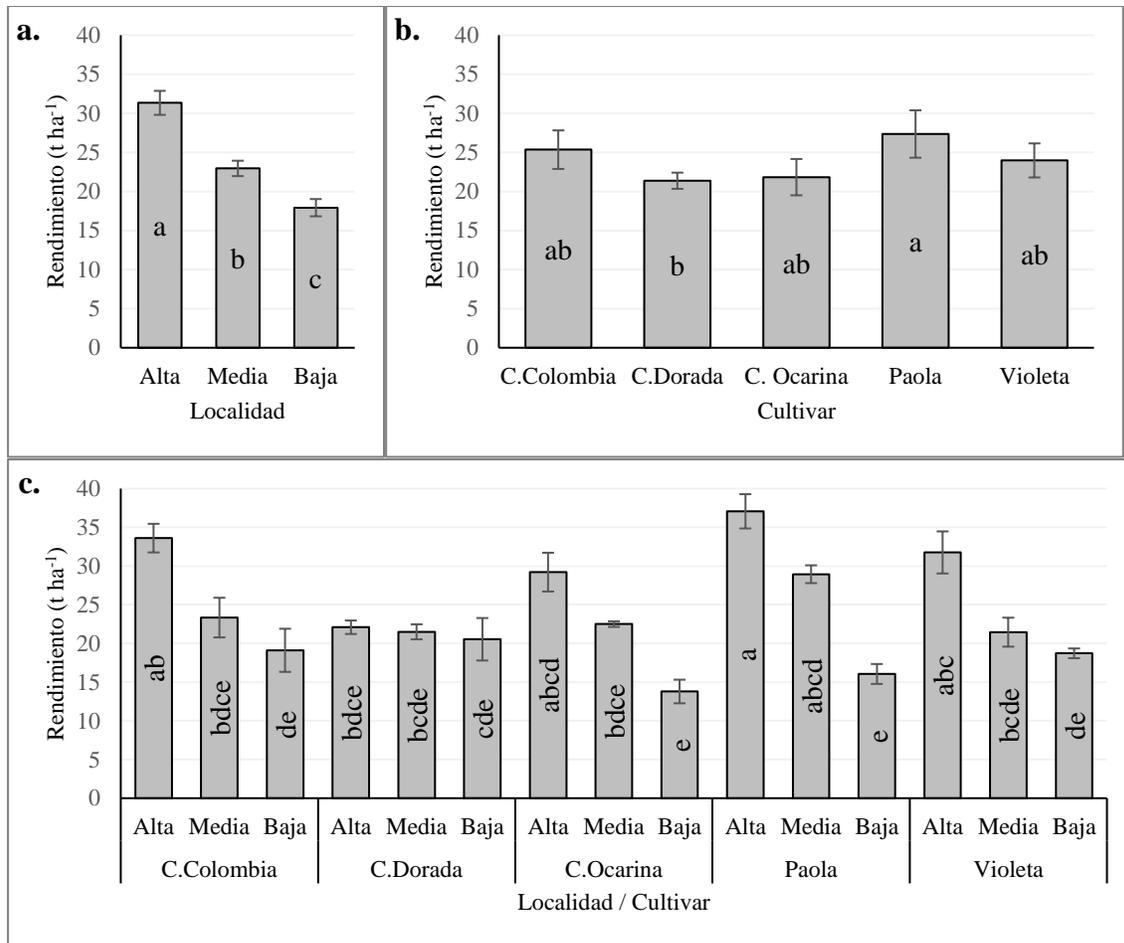


Figura 1. Rendimiento (t/ha) de cultivares de papa del grupo Phureja. a. Efecto de la localidad; b. efecto del cultivar; c. interacción localidad por cultivar. Las barras verticales representan error estándar ($n = 45$). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Fuente: Elaboración propia

El factor *localidad* modificó el PC, aumentando el PC1° con la altitud (L-alta: 78,4 %; L-media: 67,7 %; L-baja: 52,9 %) mientras el PC2° (L-alta: 18,0 %; L-media: 24,9 %; L-baja: 36,3 %) y PC3° (L-alta: 3,6 %; L-media: 7,4 %; L-baja: 10,7 %) disminuyeron (figura 2a). Para el factor *cultivar*, PC1° y PC2° fueron similares en Criolla Colombia, Paola y Violeta (PC1°: 66,1 %; PC2°: 26,1 %). Criolla Dorada presentó el mayor PC1° (69,8 %) y el menor PC2° (22,8 %), mientras Criolla Ocarina fue el cultivar con menor PC1° (60,1 %) y mayor PC2° (32,4 %) (figura 2b). La interacción *localidad por cultivar* mostró que la mayor altitud favoreció el PC1° y disminuyó PC2° y PC3° de manera diferencial entre cultivares (figura 2c).

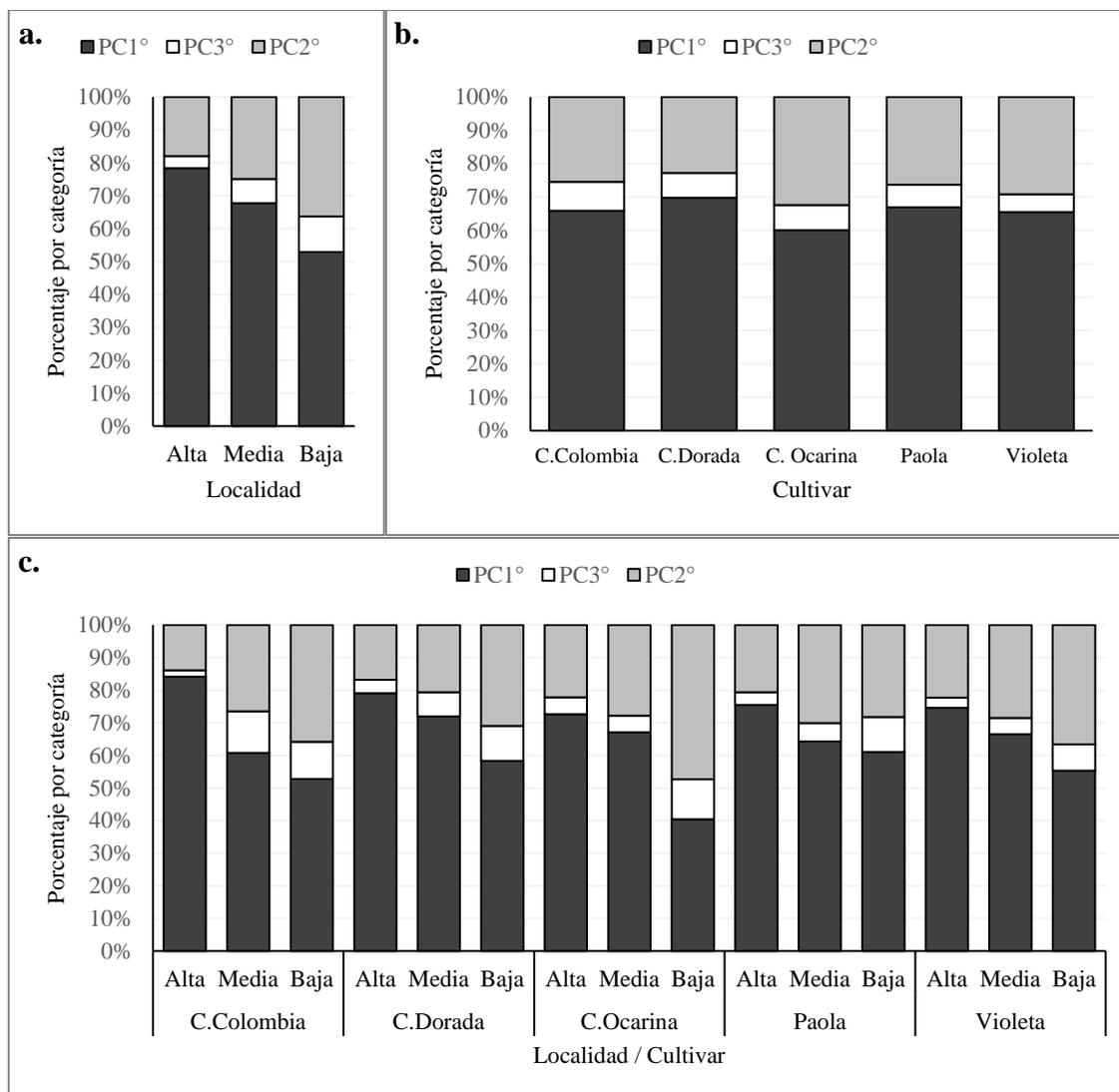


Figura 2. Porcentaje por categoría del rendimiento en cultivares de papa del grupo Phureja. a. Efecto de la localidad; b. Efecto del cultivar; c. Interacción localidad por cultivar. PC1°: Porcentaje categoría 1°; PC2°: porcentaje categoría 2°; PC3°: porcentaje categoría 3° ($n = 45$) Fuente: Elaboración propia

El factor *localidad* modificó el NT, que fue mayor en la localidad alta (33) con respecto a la media y baja (26), y estas no se diferenciaron entre sí (figura 3a). Para el factor *cultivar*, Violeta presentó el menor NT (21) respecto a los demás cultivares (30) (figura 3b). La interacción *localidad por cultivar* mostró que solo Criolla Ocarina presentó diferencias en el NT, siendo mayor en la localidad alta (41), seguido por la localidad media (29) y la localidad baja (21). En los demás cultivares, el NT no presentó diferencias significativas, aunque para los cultivares Criolla Dorada, Paola y Violeta se observó una tendencia de aumento con la altitud (figura 3c).

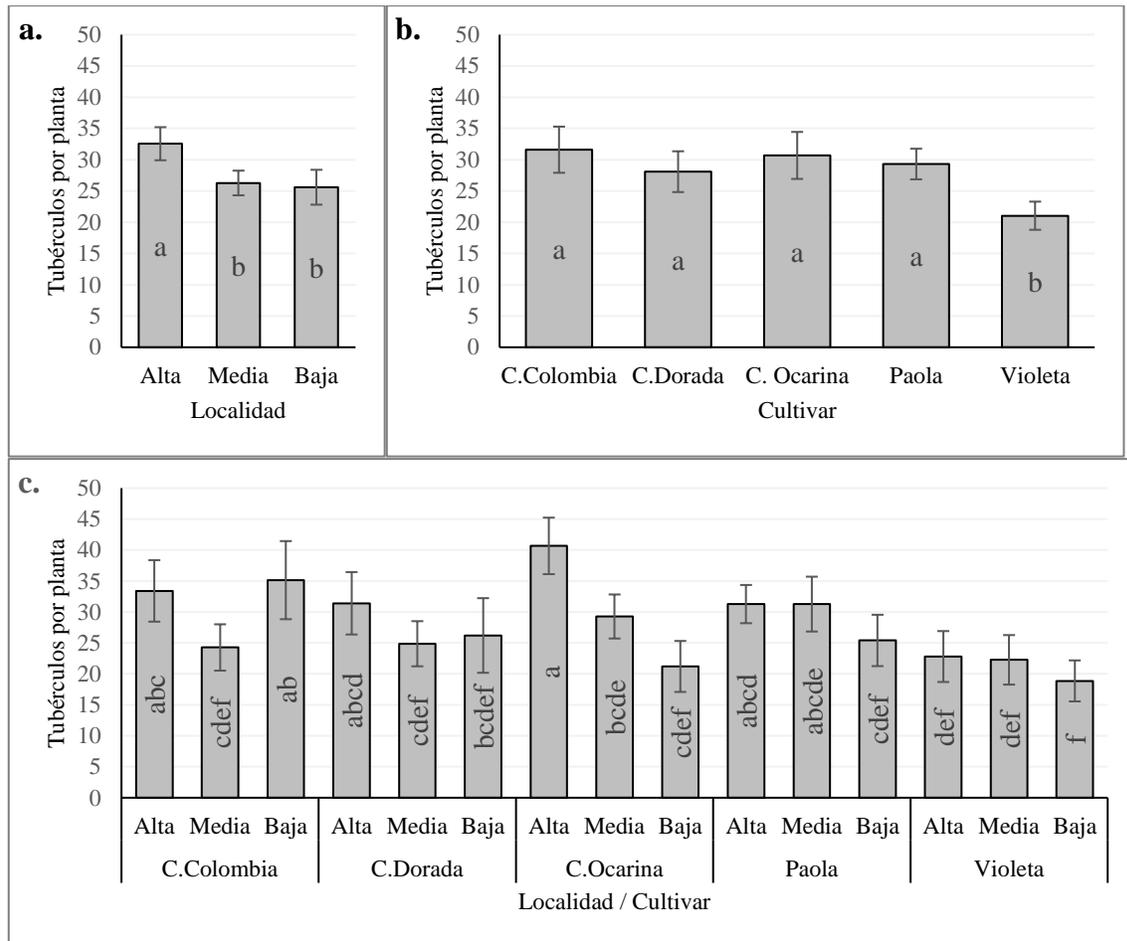


Figura 3. Número de tubérculos por sitio de siembra en cultivares de papa del grupo Phureja. a. Efecto de la localidad; b. Efecto del cultivar; c. Interacción localidad por cultivar. Las barras verticales representan error estándar ($n = 45$). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Fuente: Elaboración propia

El factor *localidad* modificó la GE, con mayores valores en la localidad alta (1,091) respecto a la media (1,089) y la baja (1,083), siendo el valor de la localidad alta significativamente mayor al de la baja (figura 4a). Para el factor *cultivar*, Paola, Criolla Ocarina y Criolla Dorada presentaron los mayores valores de GE (1,092), superiores a Violeta (1,084) y Colombia (1,074), siendo estas últimas diferentes entre sí (figura 4b). La interacción *cultivar por localidad* se explica por el efecto que tuvo la altitud en Criolla Dorada, que presentó mayor GE en la localidad alta (1,103), seguido por la localidad media (1,092) y la localidad baja (1,081), con diferencias significativas entre las localidades alta y baja (figura 4c).

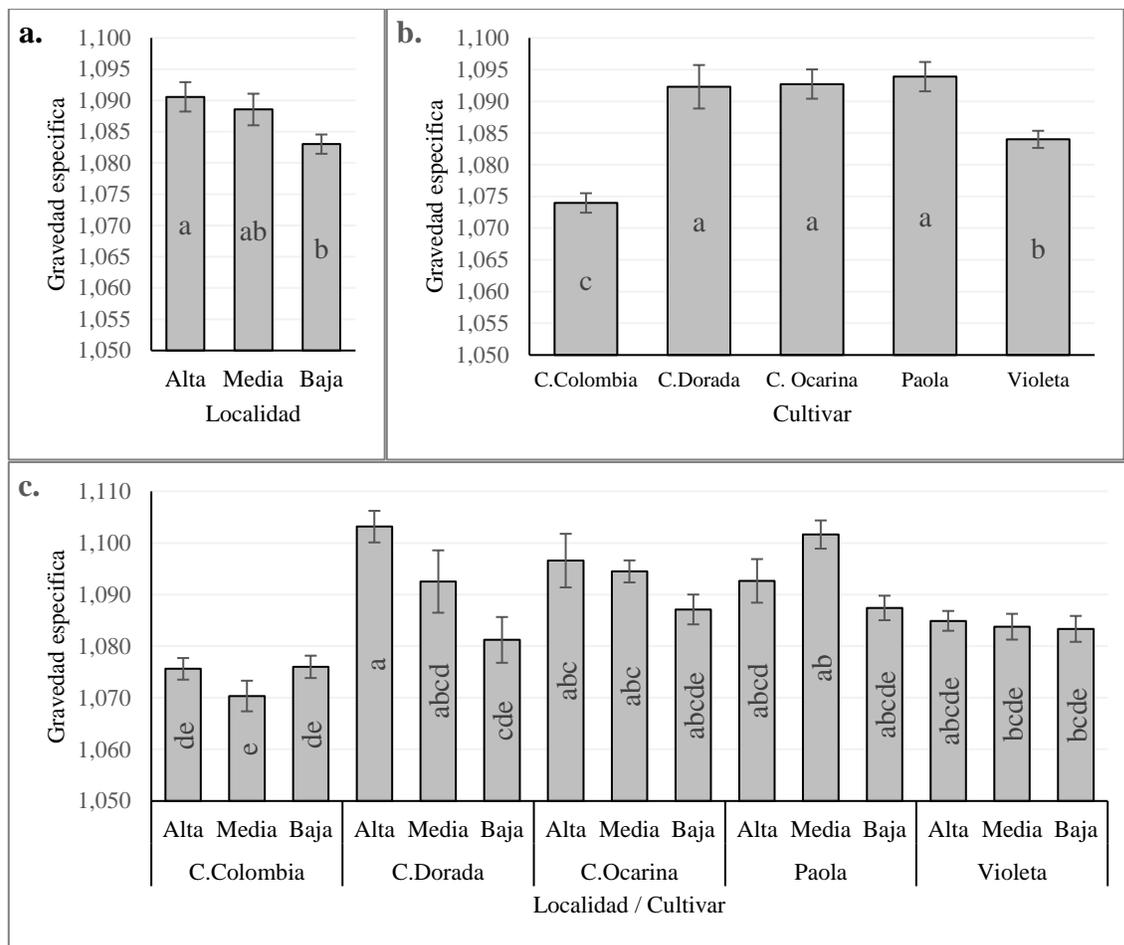


Figura 4. Gravedad específica en tubérculo en cultivares de papa del grupo Phureja. a. Efecto de la localidad; b. Efecto del cultivar; c. Interacción localidad por cultivar. Las barras verticales representan error estándar. ($n = 90$). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Fuente: Elaboración propia

El factor *localidad* modificó la RF. Se observó mayor pardeamiento en la localidad alta (2,9), seguida por la media y la baja (1,4), sin diferencias en las dos últimas (figura 5a). El factor *cultivar* no presentó diferencias (figura 5b). La interacción *cultivar por localidad* mostró que todos los cultivares, excepto Violeta, presentaron una tendencia similar en el pardeamiento entre localidades, siendo mayor en la localidad alta (2,7) respecto a las localidades media y baja (1,4).

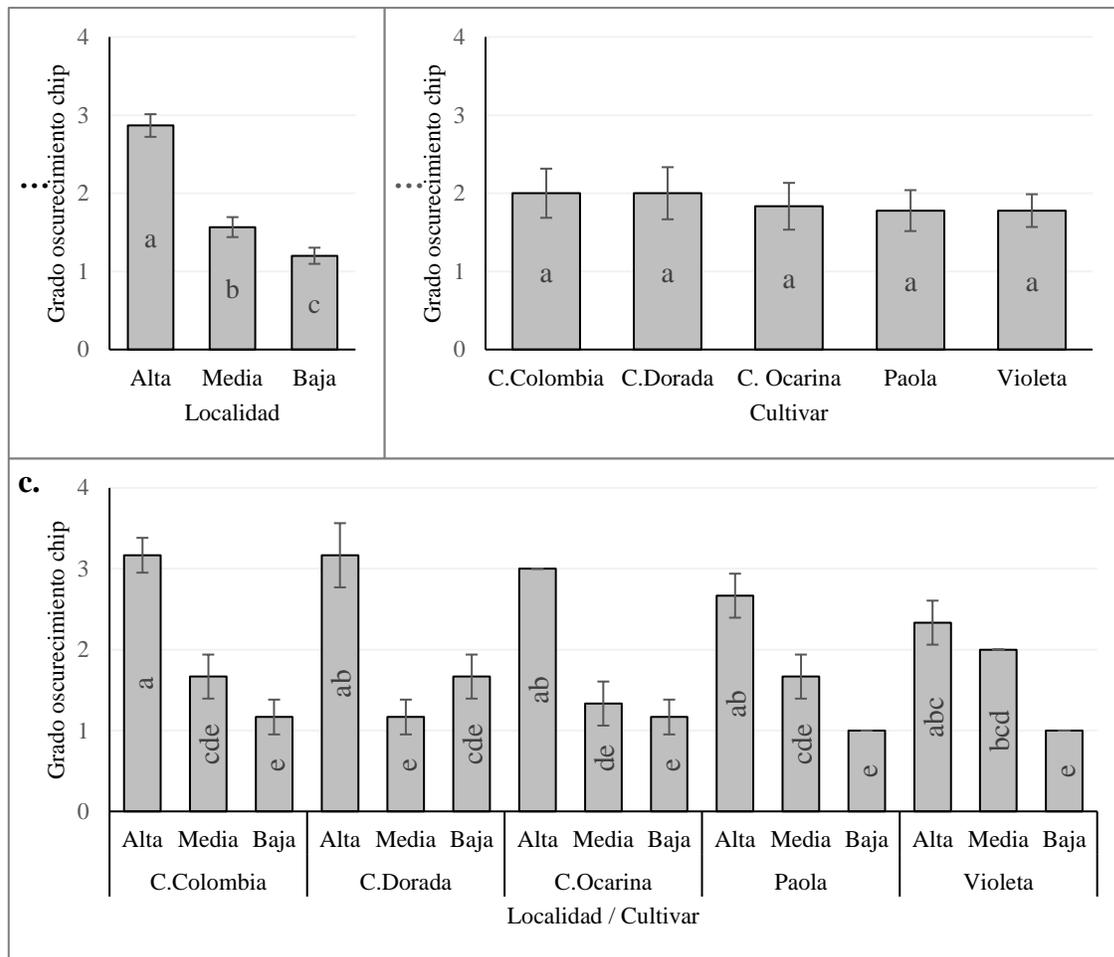


Figura 5. Respuesta a fritura en términos de grado de oscurecimiento de chips en papa del Grupo Phureja. a. Efecto de la localidad; b. Efecto del cultivar; c. Interacción localidat por cultivar. Las barras verticales representan error estándar ($n = 90$). Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según el criterio de diferencia menos significativa de Fischer y el método de ajuste de Bonferroni.

Fuente: Elaboración propia

Violeta presentó un pardeamiento significativamente menor en la localidad baja (1,0), respecto a las localidades alta y media (2,2), que no presentaron diferencias (figura 5c). La variabilidad en la respuesta de pardeamiento en el cultivar Violeta pudo deberse a incrementos en la pigmentación a mayor altitud (figura 7) que afectó la valoración visual.

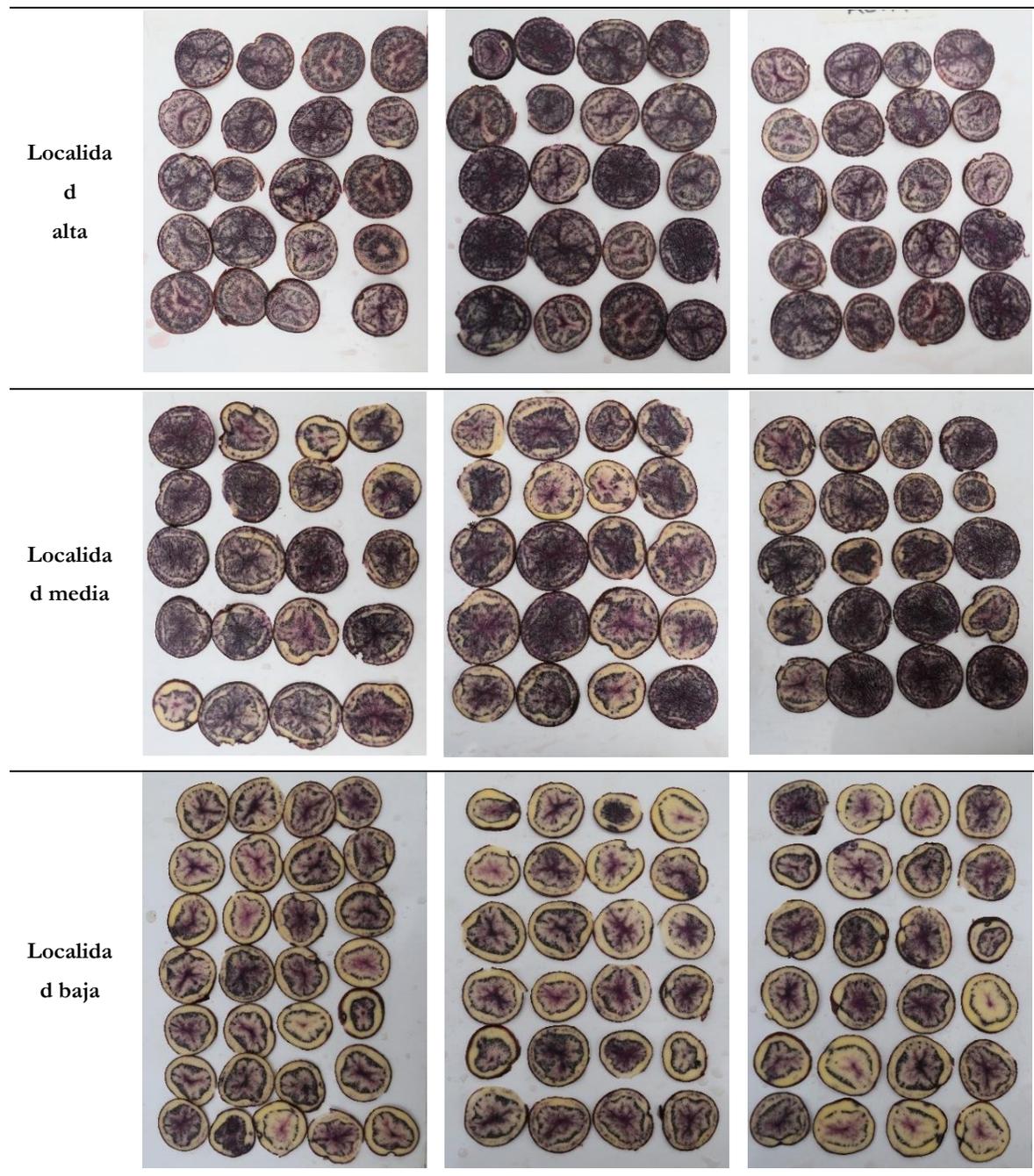


Figura 6. Pigmentación en la carne en tubérculos del cultivar Violeta (*Solanum tuberosum*, grupo Phureja), en localidades con altitudes contrastantes. Cada imagen corresponde a una de las tres repeticiones

Discusión

La presente investigación describe una variación típica de temperatura por la altitud para la región Andina colombiana, puesto que el cambio fue de 0,61 °C por cada 100 metros de altitud respecto a 0,60 °C por cada 100 metros de altitud reportado previamente (Jaramillo-Robledo, 2005). Las diferencias entre localidades en la temperatura media (tabla 1) y la diferencia entre la temperatura diurna y nocturna (ΔT° L-alta: 4,0 °C; L-media: 4,2 °C; L-baja: 2,2 °C) se consideran los dos factores que generaron la mayoría de diferencias observadas. Múltiples factores afectan la tuberización en papa, como el exceso de nitrógeno, los días largos (> 12 ddh), las noches cálidas y una mayor temperatura ambiental (Aksenova et al., 2012; Kraus, 1985; Singh & Kaur, 2016). Todos los factores descritos anteriormente se consideran condiciones no inductoras de tuberización, e involucran incrementos en los contenidos endógenos de giberelinas, que se consideran las fitohormonas más importantes en la regulación de la tuberización, pues favorecen el crecimiento de los estolones e inhiben la inducción, el inicio y el llenado de tubérculo (Aksenova et al., 2012; Hannapel, 2007; Jackson et al., 1997; Xu et al., 1998 Zierer et al., 2021). Lo descrito anteriormente se relaciona con lo observado en la localidad baja, que presentó la mayor temperatura media, y la menor diferencia entre temperatura diurna y nocturna, que pudieron afectar los procesos de inducción de la tuberización en esa localidad.

En la presente investigación se encontró que la altitud afectó variables de productividad evaluadas. Mayor altitud favoreció el RT en la mayoría de cultivares, la producción de tubérculos grandes (PC1°), la disminución de tubérculos pequeños (PC2° y PC3°) y el NT en algunos cultivares. Las respuestas observadas se pueden explicar a partir de diferentes enfoques fisiológicos relacionados entre sí. Desde el balance de carbono, se ha reportado que temperaturas bajas benefician la fotosíntesis neta (Moreno, 1985), a partir de un menor gasto en procesos de respiración que favorece el crecimiento de la planta y el llenado de los tubérculos (Barman, 2019; Fischer & Orduz, 2012; Rodríguez- Pérez, 2010). Por otra parte, se debe tener en cuenta que la altitud pudo incrementar la oferta de radiación y, con ello, la fotosíntesis bruta y su respuesta en variables de productividad (Zierer et al., 2021). No obstante, para esta investigación no se midió radiación. Desde la relación fuente-vertedero, se ha reportado que menor temperatura puede aumentar la velocidad en procesos de translocación y la fuerza del vertedero (Cai et al., 2012; Santos, 2010). En papa, las temperaturas junto con la luz actúan como señalizadores de la tuberización (Zierer et al., 2021). Temperaturas bajas hacen más precoces los procesos de inducción de tuberización y aumentan el periodo de llenado de tubérculos (Helder et al., 1993; Struik, 2007), lo que permite que los tubérculos de mayor edad fisiológica puedan crecer más, aunque esta jerarquía no siempre se cumple (Struik, 2007). El incremento en el ciclo de cultivo puede estar relacionado con mejores respuestas en variables de productividad (Zierer et al., 2021).

El aumento en el NT con la altitud para algunos cultivares se puede relacionar con disminución en el número de estolones reabsorbidos, la inducción temprana de la tuberización y el aumento en el periodo de tuberización que aumenta el periodo para la diferenciación de estolones (Helder et al., 1993; Struik, 2007). Por lo general, un mayor NT implica una competencia entre vertederos que genera tubérculos homogéneos en tamaño (Struik, 2007), como se observó en el cultivar Criolla Ocarina. Para el rendimiento, la variabilidad por el factor L definido por el componente ambiental fue mayor (CV: 23,0 %) que la generada por el factor C definido por los cultivares (CV: 9,0 %), lo que demuestra la alta influencia que tiene este factor en los cultivares evaluados. Debido a que esta investigación empleó cultivares mejorados y a que el rendimiento es uno de los criterios más importantes en los procesos de mejoramiento (Haynes, 2001), la variación fue baja (21,4 t/ha para Criolla Dorada y 27,3 t/ha para Paola) contrario a otros estudios en la subsp.

andigena (Reategui et al., 2019) y el grupo Phureja, en el que la variación en el rendimiento entre genotipos fue alta (Escallón et al., 2005; Rodríguez et al., 2009; Santos, 2010; Seminario et al., 2017; Seminario-Cunyat et al., 2018).

Criolla Colombia presenta un amplio rango de adaptación en altitud (2.400 a 3.200 m s.n.m.) y es el más plantado en las regiones productoras de Colombia (Ñústez, 2018). En esta investigación, Criolla Colombia presentó un rendimiento de 25,3 t/ha, semejante a lo reportado por Ñústez (2011) y Santos (2010). Criolla Dorada fue el cultivar de morfotipo “papa criolla” evaluado con mayor estabilidad en variables de productividad por la altitud, así como el menor NT y el mayor PC1°. Estas características indican que Criolla Dorada es un cultivar eficiente en la producción de tubérculos grandes (Ñústez, 2010). Criolla Ocarina fue un cultivar con un buen desempeño en variables de productividad en las localidades media y alta, pero se afectó en la localidad baja, lo que indica su alta respuesta al ambiente de cultivo. Por su parte, Criolla Ocarina presenta homogeneidad en el tamaño de tubérculo debido a un alto NT y mayor PC2°, que la hace potencialmente adecuada para el proceso de papa precocida congelada (Rivera et al., 2011), aunque se deben verificar otras características.

El cultivar Paola se caracterizó por un bajo NT para la localidad baja y un porcentaje alto en PC1° en todas las localidades, lo que indica su potencial para la producción de tubérculos de mayor tamaño. En esta investigación, Paola presentó un rendimiento promedio de 27,3 t/ha, semejante a reportes realizados para el departamento de Antioquia (Ñústez, 2010). El cultivar Violeta se caracterizó por presentar el menor NT y una alta PC1°, semejante a la observada en Paola, lo que puede asociarse a su mayor ciclo de cultivo; en esta investigación, se encontró un rendimiento alto para este cultivar 24,0 t/ha que contrasta con el reportado para el departamento de Antioquia (Ñústez, 2010). De todos los cultivares evaluados, Paola, Violeta y Criolla Ocarina tuvieron un menor desempeño en variables de productividad a menor altitud.

De forma similar a lo reportado por Rodríguez y Herrera (2011), se encontraron efectos por la interacción cultivar-localidad para GE y RF, donde mayor altitud incrementó la GE en algunos cultivares. El aumento en el porcentaje de materia seca del tubérculo puede explicarse por diferentes razones relacionadas con la altitud: la primera es la duración del ciclo de cultivo que favorece los procesos de acumulación y aumenta con la altitud (Van Heemst, 1986); otra es la disminución de la respiración de mantenimiento por noches frescas que favorece el balance neto de carbono; por último, se encuentra la fuerza del vertedero (Cai et al., 2012; Fischer & Ordúz, 2012). Existen reportes en los que se describe el efecto de factores relacionados con el suelo, como el contenido nutricional y la humedad, en el porcentaje de materia seca del tubérculo (Candy, 1980; Rodríguez & Herrera, 2011); sin embargo, para esta investigación la cercanía geográfica entre localidades permitió que las diferencias por otras variables ambientales o de suelo fueran mínimas.

La RF se afectó por la altitud de forma similar en todos los cultivares, a partir del pardeamiento de las hojuelas obtenidas de tubérculos de la localidad alta y parcialmente en la media. La respuesta observada se asocia al incremento en el contenido de azúcares reductores en el tubérculo, provenientes de la degradación del almidón, que se usan en la respiración y se acumulan cuando la temperatura es baja (Singh & Kaur, 2016; Rodríguez & Herrera, 2011). El aumento en la pigmentación de tubérculo observado en el cultivar Violeta a mayor altitud coincide con lo reportado en otras papas (Ibáñez et al., 2017; Reddivari et al., 2007; Reyes et al., 2004), donde se relaciona con el aumento en la síntesis de compuestos fenólicos como respuesta

a la mayor radiación ultravioleta B (UV-B) dada a mayor altitud (Ibáñez et al., 2017; Jansen, 2017). Debido a su pigmentación, el cultivar Violeta se caracteriza por ser un cultivar con alta presencia de antioxidantes (Benavides-Guerrero et al., 2020), los cuales corresponden principalmente a antocianinas y al carotenoide luteína (López-Rodríguez & Núñez-López, 2020).

Esta investigación genera nueva información sobre la respuesta de componente de rendimiento y variables de calidad poscosecha en papas del grupo Phureja, cultivadas en diferentes altitudes de la región Andina de Colombia. Además, presenta información específica por cultivar que aporta criterios para la toma de decisiones en el sistema productivo de papa.

Conclusiones

La presente investigación evidencia la influencia que tiene la altitud en la productividad y algunas variables poscosecha de papa del grupo Phureja. La altitud puede afectar diferentes factores ambientales, pero la temperatura juega un papel fundamental en la productividad del cultivo de papa, debido a su influencia en procesos de tuberización. Sin embargo, la altitud afecta de forma diferencial el cultivar de papa sembrado, algo que se debe considerar al momento de seleccionar un cultivar para siembra. La altitud afectó todas las variables de calidad para industria evaluadas, atribuido en gran medida a las diferencias entre las tasas respiratorias entre ambientes. Esta influencia debe tenerse en cuenta en el establecimiento de cultivos de papa del grupo Phureja para industria. La pigmentación del tubérculo aumentó con la altitud para el cultivar violeta, lo que puede asociarse a incrementos en la radiación ultravioleta con la altitud y resulta importante como estrategia para incrementar el contenido de antioxidantes en tubérculo.

Agradecimientos

Se agradece especialmente a Alfonso Lizarazo, Mariam Vásquez, Laura Ospina y Santiago Benjumea, por su apoyo en la toma de datos. Asimismo, se brinda un agradecimiento a los productores Camilo Prieto, Javier Prieto, Carlos Páez, Milson Rodríguez y Leoní Tautiva, por su apoyo en el manejo de las parcelas experimentales, y a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia. Este documento hace parte de las investigaciones realizadas en el marco de la tesis de maestría del autor principal, por la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, y es apoyado por el Convenio Especial de Cooperación Derivado 2. Corredor Tecnológico Agroindustrial - CTA, “Investigación, desarrollo y transferencia tecnológica en el sector agropecuario y agroindustrial con el fin de mejorar todo el departamento, Cundinamarca, Centro Oriente”, que cuenta con financiación de recursos del Sistema General de Regalías, de la Secretaría de Ciencia y Tecnología del Departamento de Cundinamarca, la Secretaría Distrital de Desarrollo Económico de Bogotá D. C. y contrapartidas de la Universidad Nacional de Colombia y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA.

Descargos de responsabilidad

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

Referencias

- Aksenova, N. P., Konstantinova T., Golyanovskaya S. A., Sergeeva L. I., & Romanov G. A. (2012). Review: Hormonal regulation of tuber formation in potato plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 59(4), 451-466. <http://doi.org/10.1134/S1021443712040024>
- Alzate, D., Cerón, L., Espitia, M., & Coronel-Ortiz, B. (2017). *Papa criolla Corpoica Sol Andina*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/11542>
- Barman, B., Boswami, B., Hussain, R., Khanikar, P. G., Deka, R. L., Sarmah, K., Singh, G., & Singh, A. (2019). Influence of GDA in different grow parameters of potato at agroclimatic condition of Jorhat. *The Pharma Innovation Journal*, 8(1), 247-248. <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2019&vol=8&issue=1&ArticleId=2911>
- Benavides-Guerrero, R., Revelo-Cuarán, Y., Arango-Bedoya, O. & Osorio-Mora, O. (2020). Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from two varieties of an Andean native potato (*Solanum phureja*) and evaluation of their antioxidant activity. *Información Tecnológica*, 31(5), 43-50. <http://doi.org/10.4067/S0718-07642020000500043>
- Bonierbale, M. W., Haan, S., Forbes, A., & Bastos, C. (Eds.). (2010). *Procedimientos para pruebas de evaluación estandar de clones avanzados de papa: Guía para cooperadores internacionales*. Centro Internacional de la Papa. <https://hdl.handle.net/10568/73221>
- Cai, Z. Q., Jiao, D. Y., Tang, X., Dao, X. S., Lei, Y. B., & Cai, T. (2012). Leaf photosynthesis, growth, and seed chemicals of Sacha inchi plants cultivated along an altitude gradient. *Crop Science*, 52(4), 1859-1867. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.10.0571>
- Candy, D. 1980. *Biological Functions of carbohydrates (Tertiary level Biology)*. Blackie. Scotland. 118 pp.
- De Mendiburu, F. (2021). *Agricolae: Statistical procedures for agricultural research*. R package version 1.3-5. <https://cran.r-project.org/web/packages/agricolae/agricolae.pdf>
- Escallón, R., Ramírez, M., & Núñez, C. (2005). Evaluación del potencial de rendimiento y de la resistencia a *Phytophthora infestans* (Mont. de Bary) en la colección de papas redondas amarillas de la especie *Solanum phureja* (Juz. et Buk.). *Agronomía Colombiana*, 23(1), 35-41. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/19894>
- Espinosa, J., & Molina, E. (1999). *Acidez y enclado de suelos*. IPNI.
- Ewing, E. E. & P. C. Struik, 1992. Tuber formation in potato: induction, initiation, and growth. *Horticultural Reviews*, 15, 89-198. <https://doi.org/10.1002/9780470650523.ch3>
- Faostat. (2019). *Production and consumption world statistics (Year 2018)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Federación Colombiana de Productores de Papa (Fedepapa). (2020). *Informe trimestral VI trimestre 2020. Sistema de información y estudios económicos*. Fedepapa. <https://fedepapa.com/econopapas-trimestrales/>
- Fischer, G., & Orduz, J. (2012). Ecofisiología en frutales. In: Fischer, G. (Ed.). *Manual para el cultivo de frutales en el trópico*. (1st ed., pp. 54-72)

- Gallón, M., Cortés, M., & Cotes, J. (2019). Evaluation and modeling of the properties and antioxidant characteristics of a new potato variety (Primavera) during storage at 4 °C. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(2), 8873-8881. <http://doi.org/10.15446/rfnam.v72n2.75155>
- Ghislain, M., Andrade, D., Rodríguez, F., Hijmans, R. J. & Spooner, D. M. (2006). Genetic analysis of the cultivated potato *Solanum tuberosum* L. Phureja Group using RAPDs and nuclear SSRs. *Theoretical and Applied Genetics*, 113, 1515-1527. <http://doi.org/10.1007/s00122-006-0399-7>
- Gregory, L. E. (1956). Some factors for tuberization in the potato plant. *American Journal of Botany*, 43(3), 281-288. <http://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1956.tb10492.x>
- Hannapel, D. (2007). Signalling the induction of tuber formation. En D. Vreugdenhil, J. Bradshaw, C. Gebhardt, F. Govers, D. MacKerron, M. Taylor, & H. Ross (Eds.), *Potato biology and biotechnology: Advances and perspectives* (pp. 237-256). <https://doi.org/10.1016/B978-044451018-1/50054-3>
- Haynes, K. (2001). Variance components for yield and specific gravity in a diploid potato population after two cycles of recurrent selection. *American Journal of Potato Research*, 78(1), 69-75. <http://doi.org/10.1007/bf02874827>
- Helder, H., Miersch, O., Vreugdenhil, D., & Sembdner, G. (1993). Occurrence of hydroxylated jasmonic acid in leaflets of *Solanum demissum* plants grown under long and short-day conditions. *Plant Physiology*, 88(4), 647-653. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1993.tb01384.x>
- Herrera, A., & Rodríguez, L.E. (2011). Tecnologías en producción y transformación de papa criolla. Universidad Nacional de Colombia.
- Huaman, Z., & Spooner, D. M. (2002). Reclassification of landrace populations of cultivated potatoes (*Solanum sect. Petota*). *American Journal of Botany*, 89(6), 947-965. <http://doi.org/10.3732/ajb.89.6.947>
- Ibáñez, V. N., Berli, F. J., Masuelli, R. W., Bottini, R. A., & Marfil, C. F. (2017). Influence of altitude and enhanced ultraviolet-B radiation on tuber production, seed viability, leaf pigments and morphology in the wild potato species *Solanum kurtzianum* Bitter & Wittm collected from an elevational gradient. *Plant Science*, 261, 60-68. <http://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.04.014>
- Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2004). Mapa de unidades de suelos de la Sabana de Bogotá, escala 1:200.000. <http://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003002502799/Mapa/pdf/2105027991300001.pdf>
- Jackson, S. D., Prat, S. & Thomas, B. (1997). Regulation of tuber induction in potato by daylength and phytochrome. *Acta Horticulturae*, 435, 159-170. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.435.15>
- Jansen, M. (2017). Ultraviolet-B Radiation: from stressor to regulatory signal. En Shabala, S., (Ed.), *Plant stress physiology* (pp. 367-391). CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781845939953.0266>
- Jaramillo-Robledo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia* (1.^a ed.). Cenicafe.
- Jing, L., & Jichao Y. (2012). Research progress in effects of different altitude on rice yield and quality in China. *Greener Journal of Agricultural Sciences*, 2(7), 340-344. http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:0-qUi7r0kr0J:scholar.google.com/&hl=es&as_sdt=0,5&as_vis=1

- Kim, C., Ok, H.-C., Jeong, J., Hur, O., Seo, J.-H., Jeong, K.-H., & Kim, S. (2012). Effects of altitude and planting time on tuber bulking of potato. *The Korean Journal of Crop Science*, 57(4), 418-423. <https://doi.org/10.7740/KJCS.2012.57.4.418>
- Krauss, A. (1985). Interaction of nutrients and tuberization. In: Li, P.H. (ed.) *Potato Physiology*. (1st ed., pp. 209-230). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-447660-8.50011-9>
- 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>
- Manrique, L. J., & Nústez C. E. (2014). Absorción de Aceite en Hojuelas de Papa de la Colección de *Solanum tuberosum* Grupo Phureja de la Universidad Nacional de Colombia. *Acta Horticulturae*, 1016, 95-102. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1016.11>
- McCrum-Gardner, E. (2008). Which is the correct statistical test to use? *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 46(1), 38-41. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2007.09.002>
- Moreno, U. (1985). Potato Physiology. En H. Li (Ed.), *Environmental effects of growth and development of potato plants* (481-501). . Academic Press Inc.
- Navarre, R., & Pavék, M. (2014). *The potato botany, production and uses*. CABI.
- Ñúñez, C. E.. (2010). *Variedades de papa liberadas por la Universidad Nacional de Colombia, Variedades diploides*. Grupo de Investigación en Papa, Universidad Nacional de Colombia. <http://www.papaunc.com/variedades-liberadas-por-la-universidad-nacional-de-colombia>
- Ñúñez, C. E. (2011). *Variedades colombianas de papa* (1.^a Ed.). Universidad Nacional de Colombia.
- Ñúñez, C. E. (2018). Papas diploides: Un legado ancestral para la agricultura en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.papaunc.com/blog/papas-diploides-un-legado-ancestral-para-la-agricultura-en-colombia>
- Reategui, K., Aguirre, N., Oliva, R., & Aguirre, E. (2019). Fenología y rendimiento de cuatro variedades de papa en el Altiplano peruano. *Scientia Agropecuaria*, 10(2), 265-274. <http://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.02.12>
- Reddivari, L., Hale, A., & Miller, J. (2007). Genotype, location, and year influence antioxidant activity, carotenoid content, phenolic content, and composition in specialty potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(1), 8073-8079. <http://doi.org/10.1021/jf071543w>
- Reyes, L., Miller, J., & 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 Botany Research*, 81(1), 187-193. <http://doi.org/10.1007/BF02871748>
- Rivera, J., Herrera, A., & Rodríguez, L. (2011). Assessment of the processing profile of six “creole potato” genotypes (*Solanum tuberosum*, Phureja Group). *Agronomía Colombiana*, 29(1), 73-81. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/28638>
- Rodríguez, L., Núñez, C. E., & Estrada, N. (2009). Criolla Latina, Criolla Paisa and Criolla Colombia, new cultivars of “diploid potato” for the province of 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
- Rodríguez-Pérez, L. (2010). Ecofisiología del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 4(1), 97-108. <http://doi.org/10.17584/rcch.2010v4i1.1229>

- Rojas, L., & Seminario, J. (2014). Productividad de diez cultivares promisorios de papa chaucha (*Solanum tuberosum*, Grupo Phureja) de la región Cajamarca, *Scientia Agropecuaria*, 5(1), 165-175. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.04.01>
- Santos, 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]. Repositorio UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11327>
- Seminario, J., Seminario, A., Domínguez, A., & Escalante, B. (2017). Rendimiento de cosecha de diecisiete cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) del grupo Phureja. *Scientia Agropecuaria*, 8(3), 181-191. <http://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.03.01>
- Seminario-Cunya, J., Villanueva-Guevara, R., & Valdez-Yopla, M. (2018). Rendimiento de cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) amarillos precoces del grupo Phureja. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 639-653. <http://doi.org/10.15517/ma.v29i3.32623>
- Singh, N., & Ahmed, Z. (2008). Effect of mulching on potato production in high altitude cold arid zone of Ladakh. *Potato Journal*, 35(3-4), 118-121.
- Singh, J., & Kaur, L. (2016). *Advances in potato chemistry and technology* (2.ª Ed.). Elsevier.
- Struik, P. C. (2007). Responses of the potato plant to temperature. En D. Vreugdenhil, J. Bradshaw, C. Gebhardt, F. Govers, D. MacKerron, M. Taylor, & H. Ross (Eds.), *Potato biology and biotechnology: Advances and perspectives* (pp. 367-391). Elsevier.
- Unidad de Planeación Rural Agropecuaria (UPRA). (2016). *Cultivo Comercial de Papa identificación de Zonas Aptas en Colombia, a escala 1:100.000*. https://upra.gov.co/documents/10184/13821/Zonificaci%C3%B3n_papa
- Van Heemst, H. D. (1986). The distribution of dry matter during growth of a potato crop. *Potato Research*, 29(1), 55-66. <https://doi.org/10.1007/BF02361981>
- 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 Subachoque, Colombia. *Acta Agronómica*, 69(3), 179-187. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n3.77051>
- Viola, R., Roberts, A., Haupt, S., Gazzani, S., Hancock, R., Marmioli, N., Machray, G., & Oparka, K. (2001). Tuberization in potato involves a switch from apoplastic to symplastic phloem uploading. *The Plant Cell*, 13(2), 385-398. <https://doi.org/10.2307/3871283>
- Vreugdenhil, D., & Struik, P. C. (1989). An integrated view of the hormonal regulation of tuber formation in potato (*Solanum tuberosum*). *Physiologia Plantarum*, 75(4), 525-531. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1989.tb05619.x>
- Wiley, N. (2016). *Environmental plant physiology* (1.ª ed.). Taylor & Francis Group.
- Xu, X., Vreugdenhil, D., & Van Lammeren, A. A. M. (1998). Cell division and cell enlargement during potato tuber formation. *Journal of Experimental Botany*, 49(320), 573-582. <http://doi.org/10.1093/jxb/49.320.573>
- Zierer, W., Rüscher, D., Sonnewald, U., & Sonnewald, S. (2021). Tuber and tuberous root development. *Annual Review of Plant Biology*, 72(1), 551-580. <http://doi.org/10.1146/annurev-arplant-080720-084456>

Material suplementario

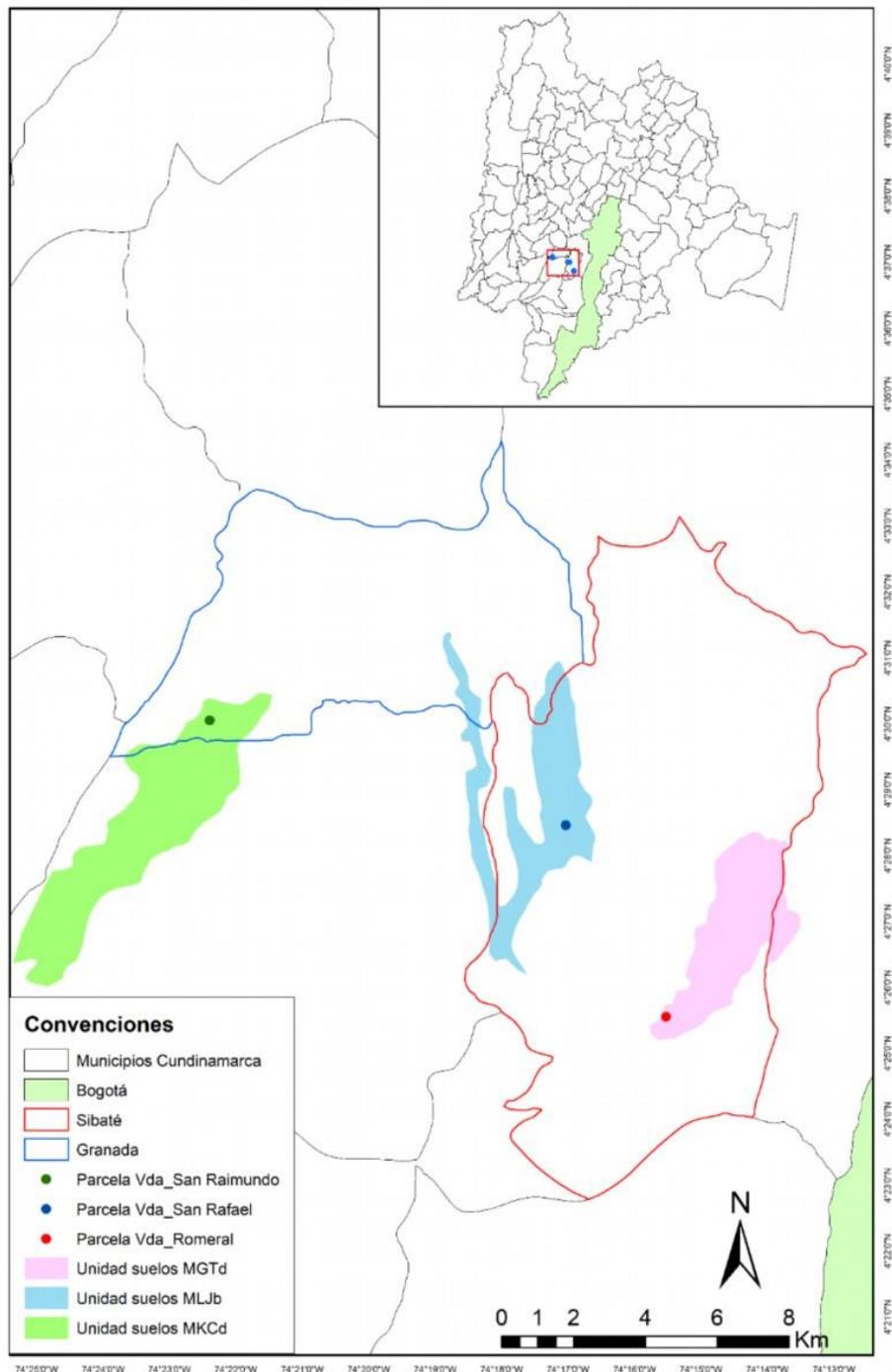


Figura suplementaria 1. Unidades de suelos de las localidades donde se realizó evaluación de los cultivares de papa del grupo Phureja. MGT: Asociación Typic Hapludands - Pachic Melanudands - Humic Lithic Dystrudepts (Localidad alta); MLJ: Asociación Typic Melanudands – Pachic Melanudands (Localidad media); Grupo indiferenciado Andic Dystrudepts y Typic Hapludands (Localidad baja) (Ingeominas, 2004).

Fuente: Leonardo Leguizamón

Criolla
Colombia



Criolla
Dorada



Criolla
Ocarina



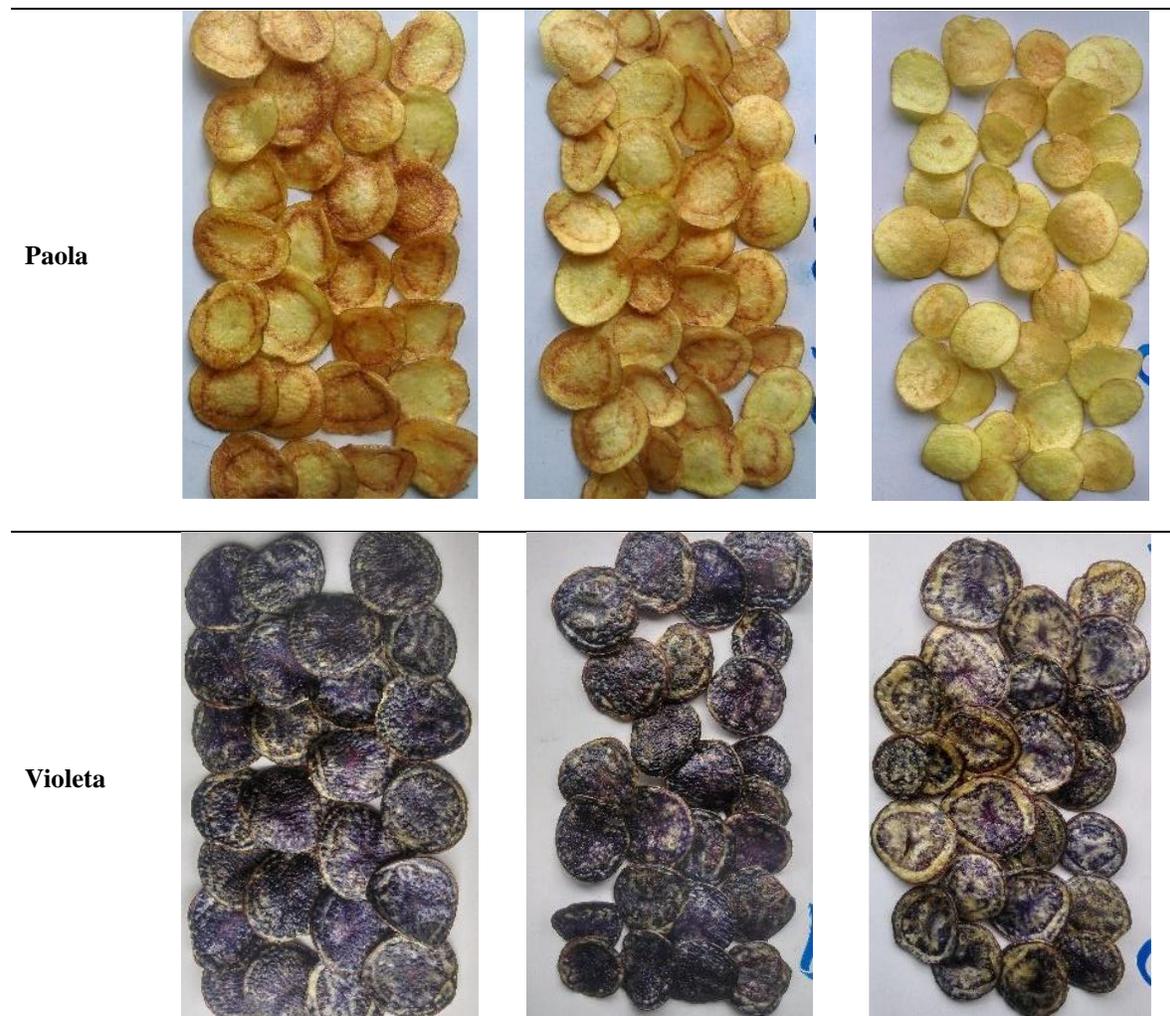
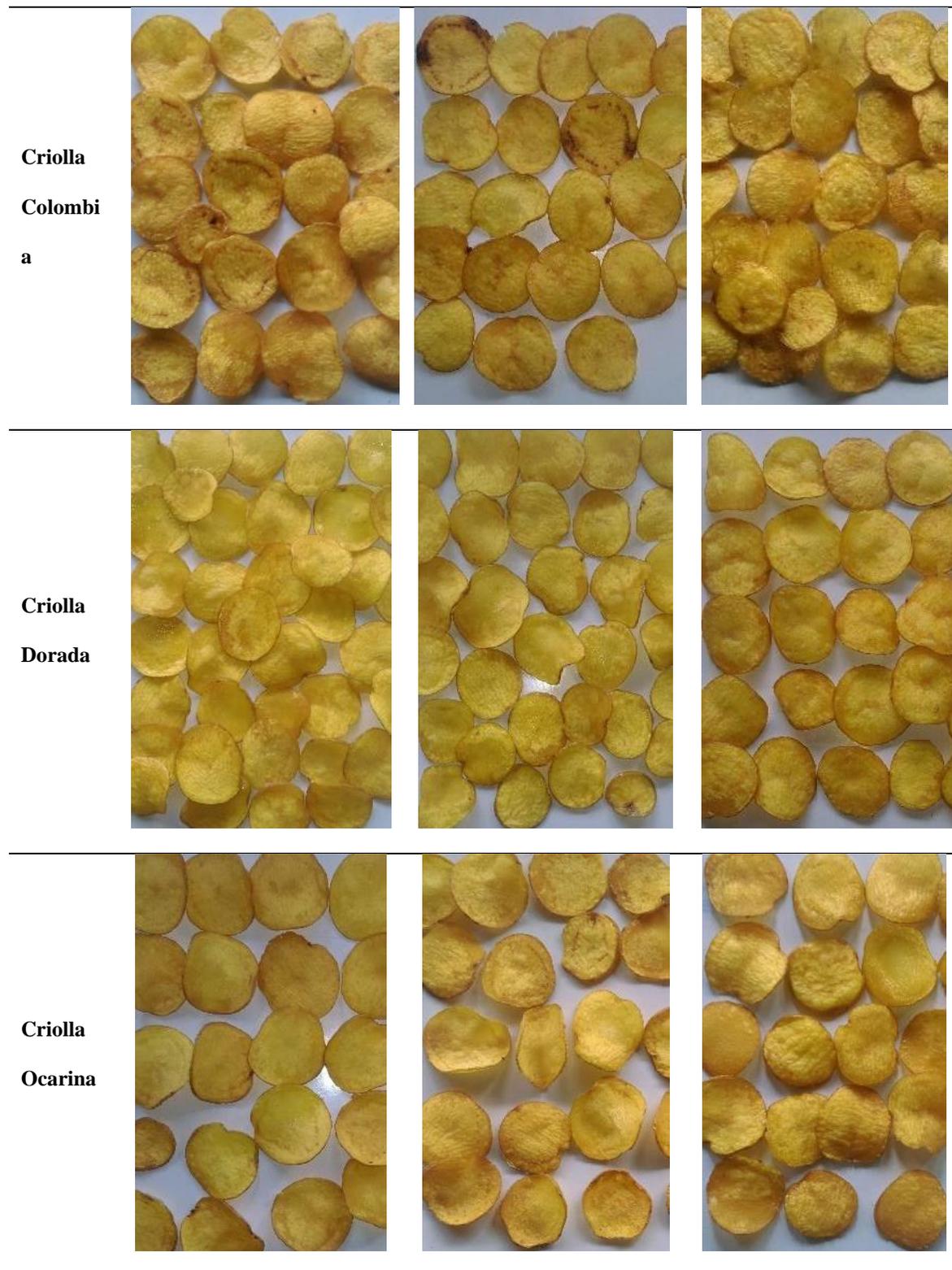


Figura suplementaria 2. Respuesta de fritura (RF) de los cultivares de papa del grupo Phureja, cosechados a 3.200 m s.n.m. (localidad alta). Cada imagen corresponde a una de las tres repeticiones



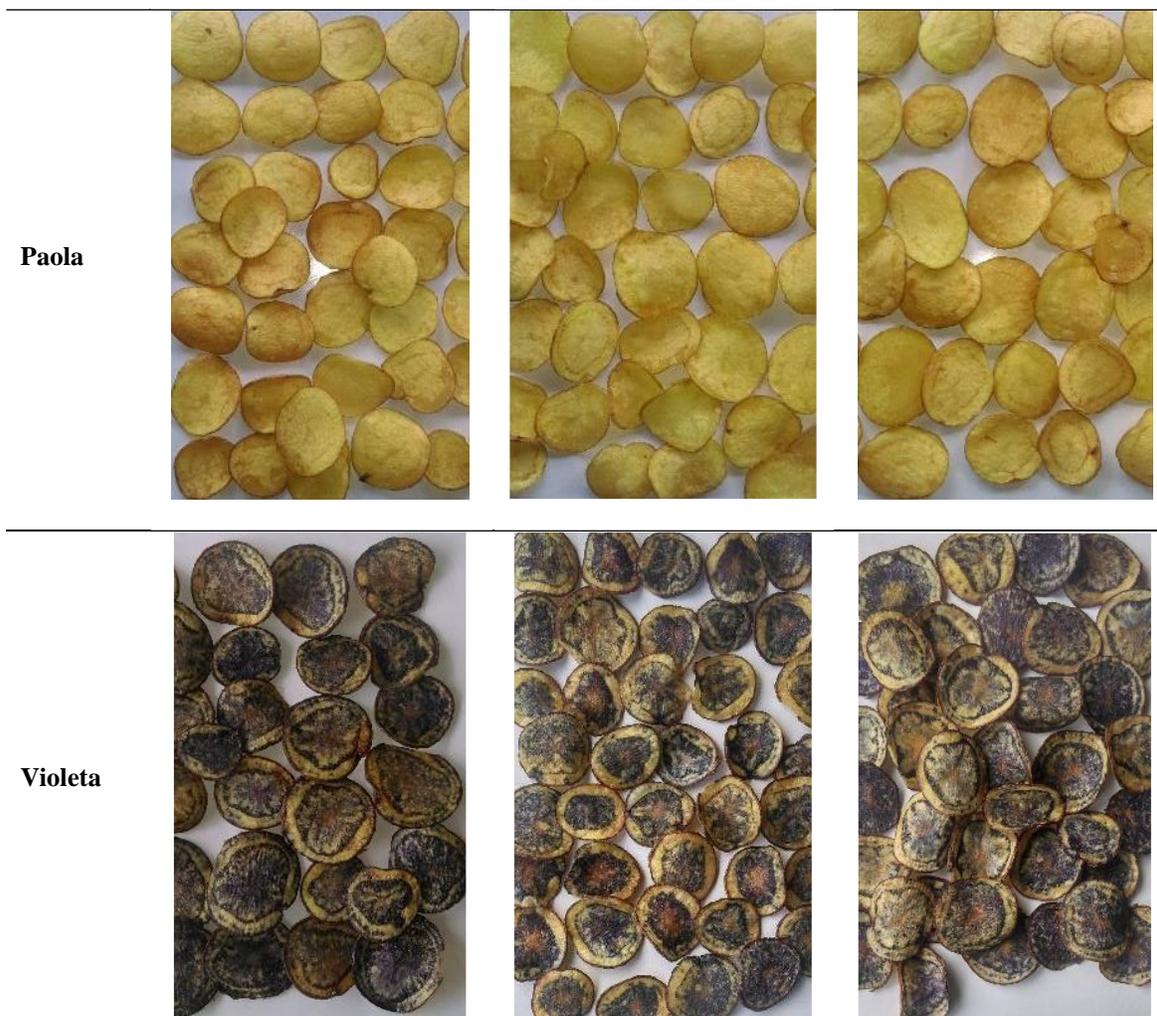


Figura suplementaria 3. Respuesta de fritura (RF) de los cultivares de papa del grupo Phureja, cosechados a 2.700 m s.n.m. (localidad media). Cada imagen corresponde a una de las tres repeticiones

Criolla
Colombia



Criolla
Dorada



Criolla
Ocarina



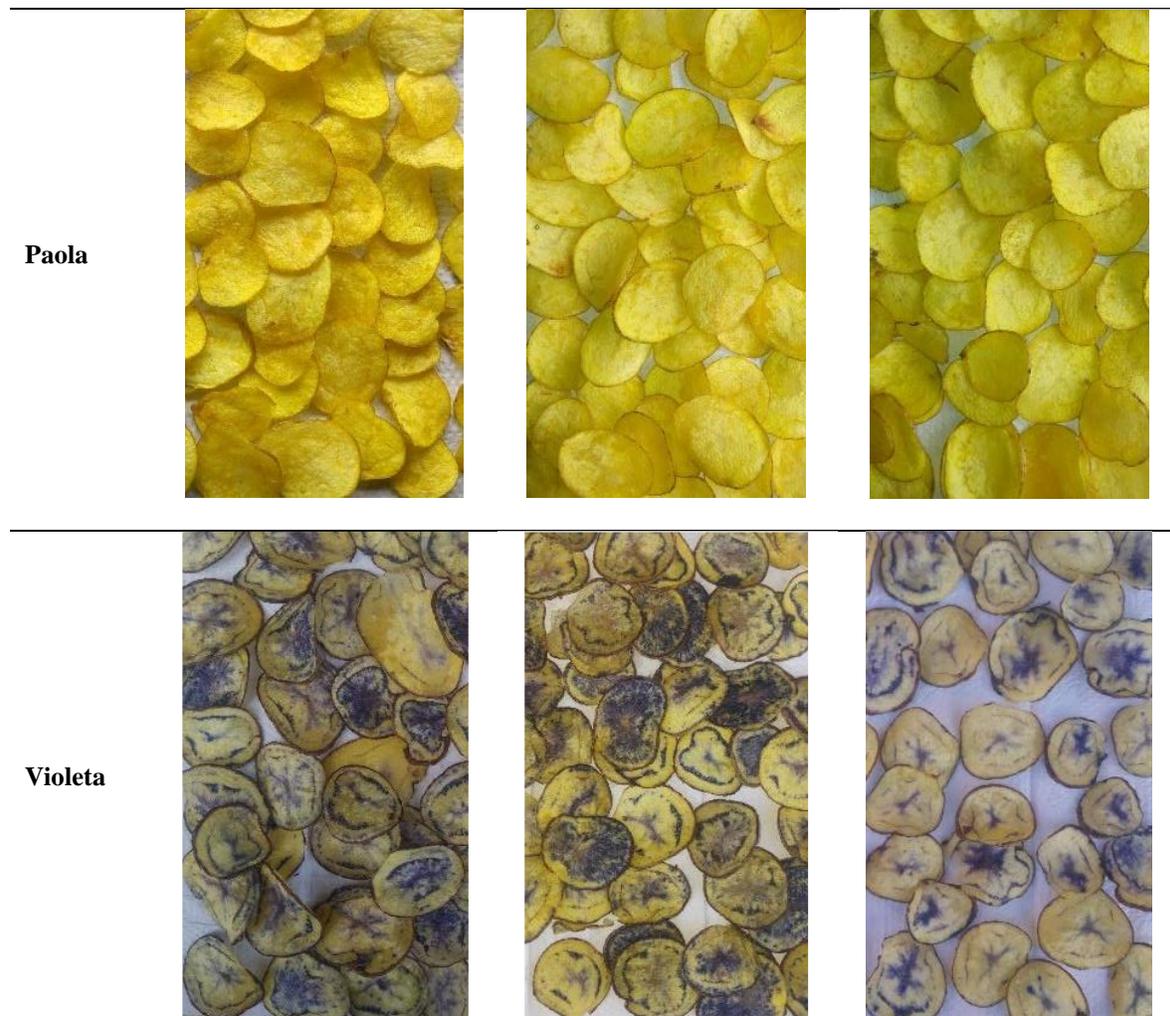


Figura suplementaria 4. Respuesta de fritura (RF) de los cultivares de papa del grupo Phureja, cosechados a 2.300 m s.n.m. (localidad baja). Cada imagen corresponde a una de las tres repeticiones.