

## CARACTERIZACIÓN DE SEIS VARIEDADES MUTANTES DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) GENERACIÓN M2 INDUCIDAS POR IRRADIACIÓN GAMMA EN CONDICIONES DE ALTIPLANO, BOLIVIA

### Characterization of six mutant varieties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) of the M2 generation induced by gamma radiation under altiplano conditions, Bolivia

Rodrigo Grover Mamani Vargas<sup>1</sup>, Rafael Adolfo Murillo García<sup>2</sup>, Estanislao Poma Loza<sup>3</sup>, Medardo Wilfredo Blanco Villacorta<sup>4</sup>, Isidro Callizaya Mamani<sup>5</sup>, Rodrigo Román Matías<sup>6</sup>, Danny José Ortiz Condori<sup>7</sup>, Carmen Liliana Muñoz Rocha<sup>8</sup>, Marco Antonio Patiño Fernández<sup>9</sup>

#### RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo caracterizar seis variedades mutantes de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) generación M2 inducidas por irradiación gamma a una dosis objetivo de 150 Gy (M1) en el Centro Multipropósito de Irradiación de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear, evaluadas en la Estación Experimental Patacamaya en el departamento de La Paz región altiplánica de Bolivia, bajo un diseño de bloques al azar con arreglo factorial. Los factores de estudio incluyeron el factor A (Insumos), con tres niveles: bocachi, humus de lombriz, testigo y el Factor B (Variedades Mutantes), con nueve niveles correspondientes a seis variedades mutantes y tres testigos. Se analizaron variables fenológicas, morfológicas, productivas y cualitativas mediante enfoques univariados y multivariados. Las condiciones ambientales restrictivas del altiplano central y la alta variabilidad fenotípica limitaron la significancia del análisis de varianza clásico. Sin embargo, el análisis de conglomerados, componentes principales y MANOVA permitió identificar patrones agronómicos consistentes. La mutagénesis inducida generó una amplia diversidad fenotípica, destacando combinaciones con alta asociación a caracteres productivos, particularmente Testigo\*M214A (G-II), Testigo\*M223A (G-IV) y el grupo (G-III) correspondiente al tratamiento Bocachi\* M28A y Humus de lombriz\*M26A. Los descriptores cualitativos confirmaron modificaciones estructurales en hábito de crecimiento y arquitectura de panoja, relevantes para la adaptación. Los resultados evidencian que la mutagénesis gamma, combinada con manejo nutricional orgánico, constituye una estrategia eficaz para generar y seleccionar variabilidad.

**Palabra clave:** Caracterización, Mutantes, altiplano, Quinoa, gamma, rendimiento.

#### ABSTRACT

The objective of this study was to characterize six mutant varieties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) M2 generation induced by gamma irradiation at a target dose of 150 Gy (M1) at the Multipurpose Irradiation Center of the Bolivian Nuclear Energy Agency, evaluated at the Patacamaya Experimental Station in the department of La Paz in the Altiplano region of Bolivia, under a randomized block design with a factorial arrangement. The study factors included Factor A (Inputs), with three levels: bocachi, worm castings, and control; and Factor B (Mutant Varieties), with nine levels corresponding to six

1 Investigador, Instituto de Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7208-7428>. [rgmamani11@umsa.bo](mailto:rgmamani11@umsa.bo).

2 Docente Investigador, Estación Experimental Sapecho, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. [rafomurillo@gmail.com](mailto:rafomurillo@gmail.com)

3 Docente Investigador, Centro Experimental Cota Cota, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9363-8211>. [pomaestanis-lao@gmail.com](mailto:pomaestanis-lao@gmail.com)

4 Docente Investigador, Estación Experimental Patacamaya, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9266-9972>. [mwblanco1@umsa.bo](mailto:mwblanco1@umsa.bo)

5 Docente, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. [isidro.caliz@gmail.com](mailto:isidro.caliz@gmail.com)

6 Especialista de la instalación del irradiador industrial gamma, Agencia Boliviana de Energía Nuclear, Bolivia. [roman@aben.gob.bo](mailto:roman@aben.gob.bo)

7 Especialista de la instalación del irradiador industrial gamma, Agencia Boliviana de Energía Nuclear, Bolivia. [dortiz@aben.gob.bo](mailto:dortiz@aben.gob.bo)

8 Investigador, Agencia Boliviana de Energía Nuclear, Dosimetría, Bolivia. [cmunod@aben.gob.bo](mailto:cmunod@aben.gob.bo)

9 Docente Investigador, Estación Experimental Patacamaya, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0582-8478>. [mapati-no1@umsa.bo](mailto:mapati-no1@umsa.bo)

mutant varieties and three controls. Phenological, morphological, productive, and qualitative variables were analyzed using univariate and multivariate approaches. The restrictive environmental conditions of the central Altiplano and high phenotypic variability limited the significance of classical analysis of variance. However, cluster analysis, principal component analysis, and MANOVA allowed for the identification of consistent agronomic patterns. Induced mutagenesis generated a wide range of phenotypic diversity, with combinations showing a strong association with productive traits standing out, particularly T1 (G-II), T4 (G-IV), and the group (G-III) corresponding to treatments T5 and T14. Qualitative descriptors confirmed structural changes in growth habit and panicle architecture, which are relevant for adaptation. The results demonstrate that gamma mutagenesis, combined with organic nutritional management, constitutes an effective strategy for generating and selecting for variability.

**Keywords:** Characterization, Mutants, Altiplano, Quinoa, Gamma, yield

## INTRODUCCIÓN

La quinua es un recurso alimenticio natural de alto valor nutritivo, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023b), así como diversos estudios previos (Gaur et al., 2025; Vilcacundo y Hernández, 2017), con contenidos de proteína, grasa, carbohidratos, cenizas y fibra dietética que variarían entre 10–24%, 1.5–14.6%, 54–75.3%, 1.5–3.7% a 2.1–11.8%, respectivamente.

El número de países que cultivan quinua ha aumentado rápidamente, de 8 en 1980 a 40 en 2010 y a más de 100 países en 2021 (Pathan et al., 2022). En Bolivia, la producción nacional se distribuye principalmente en tres departamentos: Oruro (42 %), Potosí (39 %) y La Paz (19 %), cultivada en el altiplano entre los 4.000 m.s.n.m., en condiciones caracterizadas por diversos factores bióticos y abióticos (Campos et al., 2022; Canales et al., 2020; García et al., 2024). En cuanto al rendimiento, a nivel mundial oscila en 676.9 kg ha<sup>-1</sup> mientras que a nivel nacional alcanza un promedio de 327.7 kg ha<sup>-1</sup> (FAO, 2023a).

La quinua sufre una pérdida de productividad por desgaste genético, lo que limita su siembra en el altiplano (Balvoa et al., 2021; Winkel et al., 2018). Asimismo, en zonas productivas se evidencia una marcada heterogeneidad fenotípica, caracterizadas por plantas de porte reducido y arquitectura estructural débil. Esta problemática se asocia por el uso intensivo de variedades comerciales, impulsado

por la alta demanda del mercado, lo que limita la regeneración y conservación de semillas.

El mejoramiento genético convencional mediante hibridaciones requiere largos periodos para obtener características deseadas (Álvarez et al., 2019). En este contexto, la inducción de mutaciones se ha consolidado como una alternativa para generar variabilidad (Riviello-Flores et al., 2022). En particular, la radiación permite inducir mutantes morfológicos y fisiológicos (Kim et al., 2021); sin embargo, su aplicación en quinua aún requiere mayor profundización. Asimismo, se ha demostrado que no hay un margen significativo para mejorar la eficiencia en la fertilización nitrogenada en la mejora del rendimiento situación que se agrava bajo condiciones adversas, causando pérdidas totales de cosecha en zonas productivas (Friedrich, 2014; Jacobsen, 2011).

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar seis variedades mutantes de quinua generación M2, inducidas por irradiación gamma en condiciones de altiplano de Bolivia bajo fertilización orgánica (bocachi y Humus de lombriz), evaluando su comportamiento agronómico, rendimiento y tolerancia a factores bióticos y abióticos en comparación con los testigos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Región de estudio:** El ensayo se realizó de octubre 2024 a febrero de 2025, instalado en la Estación Experimental Patacamaya (EEP), esta localidad se

encuentra en el municipio de Patacamaya, provincia Aroma del departamento de La Paz con la ubicación geográfica 17°55' 48" de latitud sur (S) y 67°57' 56" de longitud oeste (O), a una altitud de 3787 m sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) localizada en la zona 19.

**Material Experimental:** Se utilizó seis variedades mutantes de quinua llamada generación M2 (Tabla 1), identificadas a partir de la generación M1 mediante irradiación gamma a una dosis objetivo de 150 Gy, aplicada a semillas de diversa procedencia. Estos materiales fueron seleccionados por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Recursos Naturales (IIAREN) durante la campaña agrícola 2022/2023, con base en características

agronómicas de interés. Asimismo, se incluyeron tres genotipos parentales no irradiados que actuaron como testigos potenciales.

**Condiciones climáticas:** Los datos climatológicos se tomaron de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, 2025), registrando un comportamiento pluviométrico acumulado de 582.67 mm, con valores mensuales irregulares de 56.62 mm (octubre), 74.8 mm (noviembre), 22.96 mm (diciembre), 176.45 mm (enero) y 98.13 mm (febrero) en todo el ciclo fenológico del cultivo. Con temperaturas máximas de 24 °C y mínimas de -6.28 °C. Según Umesh et al. (2019), ideales para el desarrollo entre 15 y 25 °C.

**Tabla 1.**

*Historial de selección genético de variedades mutantes de quinua*

Nº	Codificación/ Variedades	Generación	DLM50 estimada (Gy)	Irradiación aplicada (Gy)	Parental	PS (g)
1	M26A	M2	70.22	150	Naranjani	1
2	M220A	M2	69.34	150	Real Roja	4
3	M214A	M2	62.71	150	Chucapaca	8
4	M28A	M2	76.88	150	Real Blanca	3
5	M211A	M2	40.58	150	Surumi	3
6	M223A	M2	47.96	150	Toledo	4
7	Naranjani	Parental	0	0	Testigo	1
8	Real Roja	Parental	0	0	Testigo	4
9	Chucapaca	Parental	0	0	Testigo	8

**Nota.** PS = Peso de semilla, g = gramos, Gy = Gray

**Manejo del experimento:** Tras la identificación de la zona de estudio se aplicó riego, a capacidad de campo, posteriormente se preparó el terreno mediante el arado y rastra con un tractor agrícola, con el fin de acondicionar y favorecer el prendimiento del cultivo hasta una profundidad de 30 cm, incluyendo labores de mullido, nivelado para asegurar ángulos rectos y apertura de surcos. La siembra se realizó mediante trasplante, utilizando 12 plantines por unidad experimental, a una distancia de 0.35 m entre surcos y 0.45 m entre plantas. Previo al trasplante incorporados con sustratos a una profundidad de 10 cm con fertilización orgánica de 3.37 t ha<sup>-1</sup> (humus de lombriz) y 4.34 t ha<sup>-1</sup> (bocashi) calculadas para suplir

el déficit de nitrógeno identificado en el análisis de suelo. Se aplicó riego por goteo durante las fases fenológicas críticas del cultivo: desarrollo foliar, ramificación e inicio de la formación de la panoja. La eliminación de malezas se realizó de forma manual, con el propósito de reducir la competencia por nutrientes, luz solar y agua a intervalos mensuales. Se etiquetaron plantas representativas por unidad experimental permitiendo la identificación, seguimiento y monitoreo preciso en la toma de datos conforme al desarrollo fenológico del cultivo (Figura 1).

**Variables evaluadas:** Para determinar el efecto de los tratamientos con radiación gamma se evaluaron

variables cuantitativas como: Dos hojas falsas (HF), Dos hojas verdaderas (DHV), Cuatro hojas verdaderas (CHV), Seis hojas verdaderas (SHV), Días a la ramificación (RMC), Altura de la planta (AP), Diámetro del tallo principal (DTP), Longitud de la panoja (Lpa), Diámetro de la panoja (DP), N° de dientes en la hoja (NDH), Longitud máxima de la hoja (LMH), Ancho máximo de la hoja (AMH), Días a enpanojamiento (PN), Rendimiento por planta

(RDTO) y variables cualitativas que permitieron identificar características morfológicas y sanitarias no cuantificables directamente, útiles para el análisis descriptivo como: tipo de crecimiento (TC), Hábito de crecimiento (HC), Forma del tallo principal (FTP), Presencia de ramificación (PR), Forma de la panoja (FP), Densidad de panoja (Dpa) y Daño por aves (DPA) (Bioversity International et al., 2013).

Figura 1.

*Procedimiento experimental del estudio de caracterización de seis variedades mutantes de quinua (*Chenopodium quinoa Willd.*) generación M2 inducidas por irradiación gamma en la Estación Experimental Patacamaya, durante la gestión agrícola 2024/2025*



### Diseño experimental y análisis estadístico:

El estudio se realizó bajo un diseño de bloques al azar en un esquema factorial doble, según lo establecido por (Erazo et al., 2024; Gabriel et al., 2017) para reducir la variabilidad experimental asociada a factores edáficos establecidos en tres bloques y 27 tratamientos (Tabla 2), con unidades experimentales de 2.52 m<sup>2</sup>, conformada por seis surcos a una separación de 0.35 m entre surcos y 0.45 m entre plantas, con un área experimental total de 528.25 m<sup>2</sup>. Los tratamientos se estructuraron a partir de la combinación de dos factores en estudio (Factor A: Insumos y Factor B: Variedades mutantes M2). Para el procesamiento de los datos,

fueron sometidos a pruebas de normalidad de los residuos y homocedasticidad de varianzas. Adicionalmente se realizó técnicas multivariadas, análisis de varianza multivariante para determinar las significancias de las variables cuantitativas con el programa estadístico RStudio ver 4.4.3 e InfoStat. Primero se aplicaron métodos de análisis descriptivo. Finalmente se empleó análisis de conglomerados (método de Ward), análisis de componentes principales para identificar los tratamientos más promisorios, Prueba de Hotelling, análisis de correlación múltiple y distribución de frecuencias por descriptor.

**Tabla 2.**

*Resumen de los tratamientos por la combinación (Factor A x Factor B)*

N°	Factor A (Insumos)	Factor B (M2)	Tratamiento combinado
T1	Testigo	M214A	Testigo * M214A
T2	Bocachi	M211A	Bocachi * M211A
T3	Humus de lombriz	M220A	Humus de lombriz * M220A
T4	Testigo	M223A	Testigo * M223A
T5	Bocachi	M28A	Bocachi * M28A
T6	Testigo	M26A	Testigo * M26A
T7	Humus de lombriz	Naranjani	Humus de lombriz * Naranjani
T8	Testigo	M211A	Testigo * M211A
T9	Humus de lombriz	Real_roja	Humus de lombriz * Real_Roja
T10	Bocachi	M220A	Bocachi * M220A
T11	Testigo	Chucapaca	Testigo * Chucapaca
T12	Bocachi	M214A	Bocachi * M214A
T13	Bocachi	Naranjani	Bocachi * Naranjani
T14	Humus de lombriz	M26A	Humus de lombriz * M26A
T15	Bocachi	Real_roja	Bocachi * Real_roja
T16	Testigo	M28A	Testigo * M28A
T17	Bocachi	Chucapaca	Bocachi * Chucapaca
T18	Testigo	M220A	Testigo * M220A
T19	Humus de lombriz	Chucapaca	Humus de lombriz * Chucapaca
T20	Humus de lombriz	M223A	Humus de lombriz * M223A
T21	Testigo	Real_roja	Testigo * Real_roja
T22	Bocachi	M26A	Bocachi * M26A
T23	Testigo	Naranjani	Testigo * Naranjani
T24	Humus de lombriz	M28A	Humus de lombriz * M28A
T25	Humus de lombriz	M214A	Humus de lombriz * M214A
T26	Bocachi	M223A	Bocachi * M223A
T27	Humus de lombriz	M211A	Humus de lombriz * M211A

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis estadístico descriptivo

El análisis descriptivo (Tabla 3), muestra que la asimetría y kurtosis permitió identificar variables con distribuciones normales con datos próximos a cero permitidos dentro de los parámetros  $\pm 1$ . A

excepción de las variables N° de dientes en la hoja (NDH), Rendimiento (RDTO), Diámetro del tallo principal (DTP), Altura de la planta (AP) y Cuatro hojas verdaderas (CHV) sesgadas a la izquierda en su comportamiento.

### Análisis de conglomerados

El análisis de conglomerados (Figura 2), permitió clasificar a los tratamientos (insumos\*variedades mutantes M2) en cuatro grupos homogéneos, en función a su similaridad agronómica, considerando 14 variables cuantitativas según sus características agronómicas. Donde el grupo I agrupó a los Tratamientos T26, T10, T11, T27 y T9 caracterizados por un comportamiento agronómico similar. El grupo II incluyó a los tratamientos T24, T25, T12, T17, T20, T16, T2, T3 y T1 los cuales presentaron una afinidad intermedia respecto a las variables evaluadas. Posteriormente, el grupo III integrado por los tratamientos T13, T14, T15 y T5 evidenciando un patrón diferenciado finalmente el grupo IV compuesto por T8, T7, T22, T23, T6, T19, T21, T18 y T4 que compartieron características agronómicas comunes. En conjunto, estos resultados evidencian que la irradiación gamma generó una variabilidad agronómica significativa, permitiendo la identificación de grupos de interés para su potencial aprovechamiento en programas de selección y mejoramiento genético de quinua.

El análisis descriptivo de los grupos I, II, III y IV (Tabla 4), evidenció diferencias significativas en el comportamiento fenológico y agronómico de las variedades mutantes de quinua M2. En las fases iniciales de desarrollo, los valores medios de hojas falsas y hojas verdaderas fueron comparables entre todos los grupos; sin embargo, el grupo III presentó un menor número de hojas falsas y una mayor variabilidad (30.9), mientras que el grupo IV mostró mayor uniformidad en etapas tempranas, lo que sugiere una posible estabilización fenotípica inicial, en concordancia con Ahloowalia et al., (2004); Oladosu et al., (2016), quienes señalan que la mutagénesis induce una amplia expresión fenotípica útil.

**Tabla 3.**

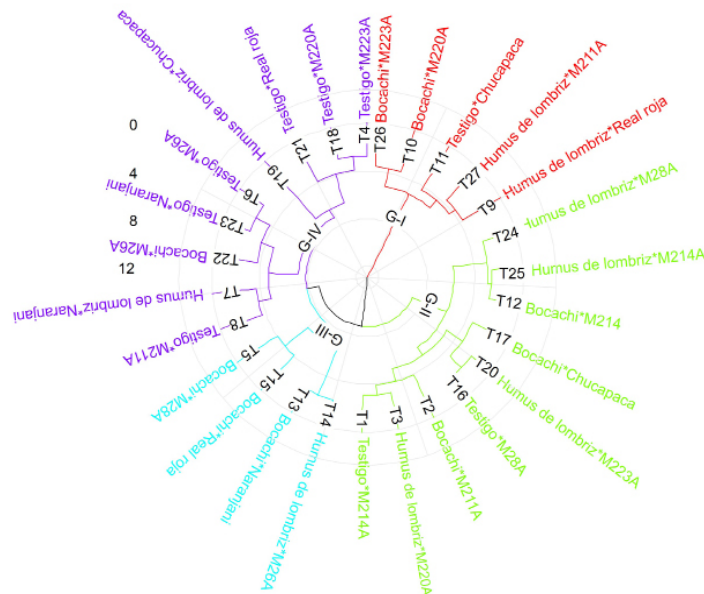
*Análisis descriptivo de variables cuantitativas evaluadas*

Variable	Media	D.E.	Var(n-1)	Mín	Máx	Asimetría	Kurtosis
HF	3.43	0.96	0.92	2	5	-0.54	-1.1
DHV	6.17	0.77	0.59	5	7	-0.31	-1.24
SHV	8.07	1.52	2.32	5	10	-0.26	-0.83
CHV	7.12	1.37	1.88	4	10	-0.05	0.33
RMC	16.07	1.81	3.27	11	20	-0.45	-0.07
AP	39.14	19.66	386.57	7	79	0.24	-0.93
DTP	1.08	0.4	0.16	0.3	2.3	0.45	0.12
Lpa	12.64	6.95	48.29	1.7	27.5	0.22	-0.97
DP	3.85	1.79	3.2	0.7	7.8	0.28	-0.61
NDH	12.63	5.13	26.31	3	23	0.1	-1.11
LMH	4.13	1.42	2.01	2	7.5	0.58	-0.52
AMH	3.11	1.23	1.52	0.9	6.4	0.33	-0.24
PN	85.28	14.36	206.28	60	115	0.56	-0.57
RDTO	5.53	7.6	57.73	0.1	44.11	2.51	7.99

**Nota.** D.E = Desviación Estándar, E.E = Error experimental, Var(n-1)= Varianza, Min = Mínimo, Max = Máximo; HF = Dos hojas falsas, DHV = Dos hojas verdaderas, CHV = Cuatro hojas verdaderas, SHV = Seis hojas verdaderas, RMC = Días a la ramificación, AP = Altura de la planta, DTP = Diámetro del tallo principal, Lpa = Longitud de la panoja, DP = Diámetro de la panoja, NDH = N° de dientes en la hoja, LMH = Longitud máxima de la hoja, AMH = Ancho máximo de la hoja, PN = Días a enpanojamiento, RDTO = Rendimiento.

**Figura 2.**

*Dendrograma circular método Ward*



En los caracteres agronómicos, el grupo I registró la mayor altura de planta (59.8 cm), seguido por el grupo IV (37.89 cm), mientras que el grupo II presentó menor porte (30.57 cm) y mayor dispersión, rasgo comúnmente observado en poblaciones mutantes debido a la segregación de caracteres cuantitativos (Riaz y Gul, 2015).

El diámetro del tallo principal fue superior en los grupos I y III (1.41 y 1.13 cm, respectivamente), en contraste con el grupo II, que presentó el menor valor medio (0.94 cm). La longitud de la panoja y el diámetro de la panoja mostraron valores más elevados en los grupos I y III, mientras que el grupo II presentó panojas de menor tamaño y alta

variabilidad.

Respecto a los caracteres foliares, el grupo I exhibió el mayor número de dientes por hoja (14.4), mientras que el grupo II registró los menores valores de longitud y ancho máximo de hoja, acompañados de coeficientes de variación elevados. En términos fenológicos, se observaron diferencias marcadas en los días a enpanojamiento, siendo el grupo I el más precoz (72,1 días) y el grupo III el más tardío (101 días), con los grupos II y IV mostrando valores intermedios. En cuanto al rendimiento, el grupo I alcanzó el mayor valor promedio (8.95 g

planta<sup>-1</sup>), seguido por el grupo IV (6.47 g planta<sup>-1</sup>), mientras que los grupos II y III presentaron los menores rendimientos promedio (4.04 y 3.36 g planta<sup>-1</sup> respectivamente), lo que indica una elevada heterogeneidad productiva dentro de cada grupo. Esta respuesta productiva heterogénea es consistente con estudios del Organismo Internacional de Energía Atómica IAEA (2025) con poblaciones mutantes, donde el rendimiento presenta alta dispersión y requiere procesos de selección sucesiva para su estabilización.

**Tabla 4.**

*Análisis descriptivo en base a los grupos identificados*

Variable	G-I				G-II				G-III				G-IV			
	Media	CV	Mín	Máx	Media	CV	Mín	Máx	Media	CV	Mín	Máx	Media	CV	Mín	Máx
HF	3.33	29.3	2	4	3.33	28.8	2	5	2.92	30.9	2	4	3.81	23	2	5
DHV	6.47	9.9	5	7	6.15	12.5	5	7	5.83	16.1	5	7	6.19	11.9	5	7
CHV	6.73	15.3	4	8	6.63	16.8	4	8	8.42	16.4	6	10	7.26	19.7	4	10
SHV	8.07	21.2	5	10	8.52	16.4	6	10	7.58	18.2	5	10	7.85	19.9	5	10
RMC	16.2	11.5	13	20	16.52	9.1	14	19	16.33	9.53	14	18	15.44	13.4	11	18
AP	59.8	25.6	34	79	30.57	53.8	7	58	35.39	64.6	9.5	78	37.89	41	16	66
DTP	1.41	25.9	0.7	2.1	0.94	36.4	0.3	1.7	1.13	42.1	0.5	2.3	1.03	33	0.5	1.8
LPa	18.51	32.6	2.9	27.5	9.84	54.9	2.2	21	15.41	42.5	6.6	26.1	10.96	62.7	1.7	25.4
DP	5.13	33.8	2.2	7.8	3.37	46.1	0.7	6.5	4.44	49.4	1.5	7.6	3.35	43.9	0.7	6.5
NDH	14.4	41	4	22	10.44	50.1	3	23	12.58	34.5	6	19	13.85	31.1	5	21
LMH	4.95	21	3.7	7.2	3.54	36.6	2.2	6.7	4.43	40.4	2	7	4.14	32.3	2.5	7.5
AMH	3.77	24.2	2.5	5.7	2.52	41	1	5	3.19	54.3	0.9	6.4	3.3	33.6	1.2	6
PN	72.13	8.59	60	80	86.89	15	65	115	101.3	14.9	70	115	83.89	13.3	65	110
RDTO	8.95	99.4	0.38	30.2	3.36	134	0.1	16	4.04	96	0.18	11.9	6.47	151	0.14	44.1

**Nota.** CV = Coeficiente de variación, Min = Mínimo, Max = Máximo, HF = Dos hojas falsas, DHV = Dos hojas verdaderas, CHV = Cuatro hojas verdaderas, SHV = Seis hojas verdaderas, RMC = Días a la ramificación, AP = Altura de la planta, DTP = Diámetro del tallo principal, Lpa = Longitud de la panoja, DP = Diámetro de la panoja, NDH = N° de dientes en la hoja, LMH = Longitud máxima de la hoja, AMH = Ancho máximo de la hoja, PN = Días a enpanojamiento, RDTO = Rendimiento.

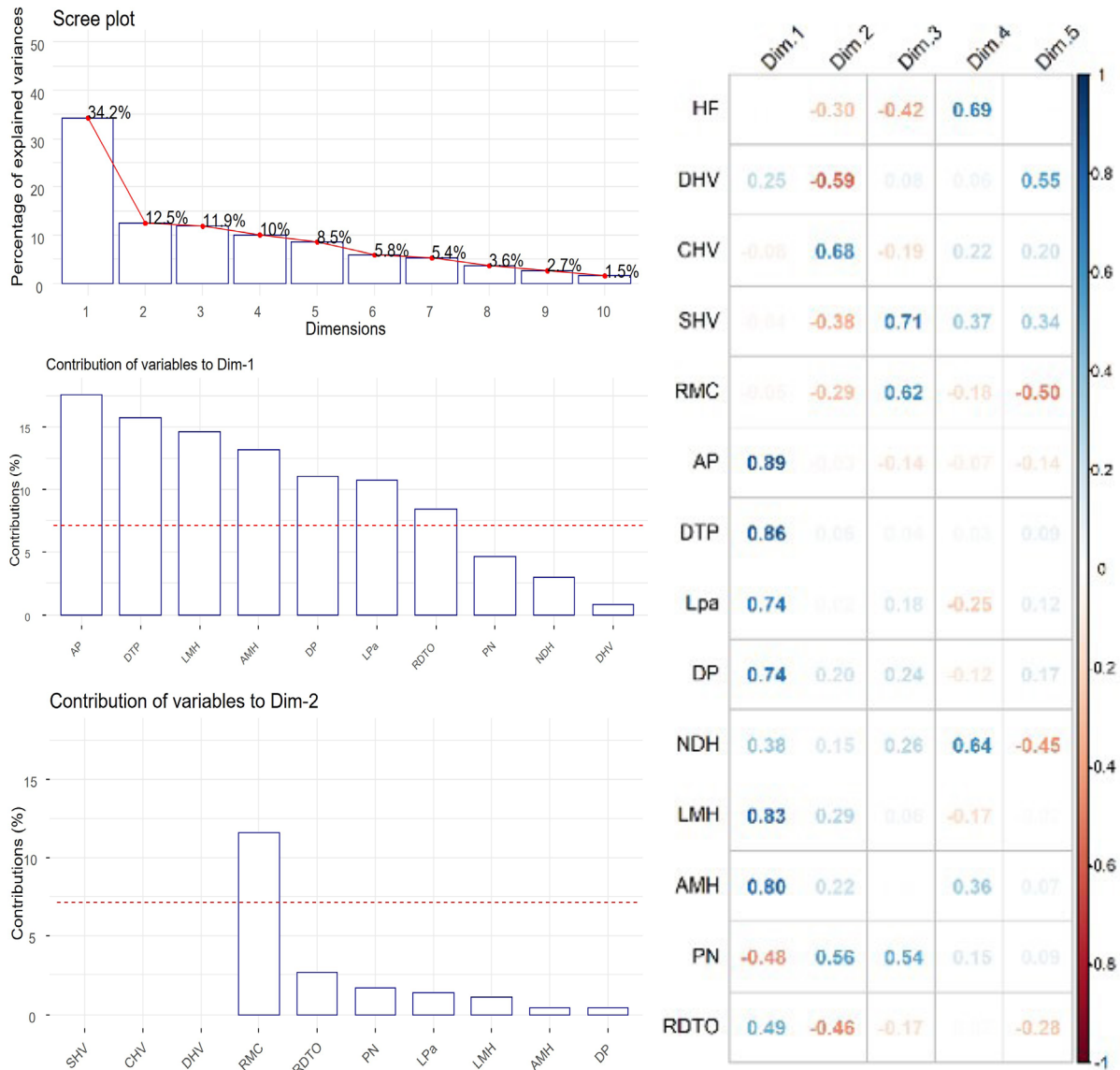
### Análisis de componentes principales

La Figura 3 presenta un gráfico de sedimentación de los componentes en orden descendente. Las primeras varianzas acumuladas de los componentes 1 y 2 muestran valores de 34.2% y 12.5% respectivamente, representando en conjunto un 46.73% de la varianza total. Según el gráfico de sedimentación se confirma que a partir de los dos primeros componentes la ganancia de información de cada variable disminuye significativamente. De manera similar Fernández et al. (2021), reportan

que el aporte de los componentes adicionales es marginal a partir del tercer componente, lo que valida que del tercero al décimo componente la contribución de cada variable se vuelve insignificante (Maji y Shaibu, 2012; Rojas, 2003). Coincidiendo con Fernández et al. (2021), quienes señalaron que la distribución de la varianza en dimensiones sucesivas refleja la importancia decreciente de las variables, lo que permite interpretar la estructura de la variabilidad y la contribución relativa de los componentes (Maji y Shaibu, 2012).

**Figura 3.**

*Sedimentación de los caracteres medidos en seis variedades mutantes M2 de quinua inducidas por rayos*



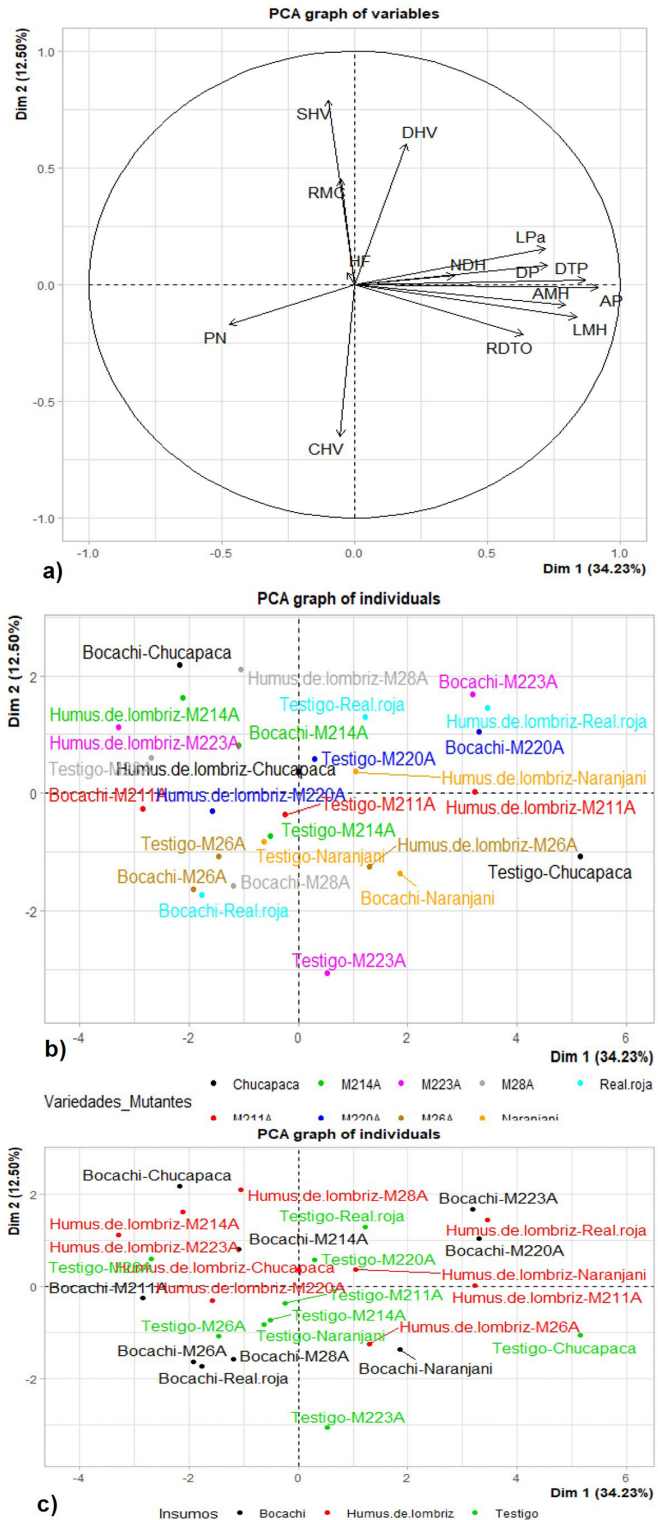
**Nota.** a) Porcentaje de varianza explicada por cada dimensión b) contribución a la varianza de los primeros 10 caracteres en la dimensión 1 c) contribución a la varianza de los primeros 10 caracteres en la dimensión 2 d) Correlación entre los caracteres estudiados y entre las primeras cinco dimensiones, (las líneas discontinuas de referencia en el gráfico de barras corresponden al valor esperado si la contribución entre los rasgos fue uniforme)

El análisis de componentes principales (ACP) presentado en la Figura 4 permitió identificar dos primeros componentes que explicaron el 46.73 % de la varianza total, donde la Dim1 aportó el 34.23% y la Dim2 el 12.5%, lo que evidencia una adecuada síntesis de la variabilidad en una proyección bidimensional, como en estudios de caracterización compleja (Cooper y DeLacy, 1994; Olivoto et al., 2022).

La Dim1 fue definido principalmente por variables asociadas al crecimiento vegetativo y productividad, destacando altura de planta (AP), longitud de panoja (Lpa), diámetro de panoja (DP) y rendimiento (RDTO), cuyos vectores presentan mayor longitud y orientación positiva sobre este eje (Figura 4a), evidenciando una correlación positiva entre caracteres coincidiendo con Olivoto et al. (2022), quienes señalan que estos rasgos

**Figura 4.**

*Análisis de componentes principales (ACP) en seis variedades mutantes de quinua M2 evaluadas bajo tres tipos de insumos correspondientes a la caracterización multivariada*



**Nota.** HF= Dos hojas falsas, DHV = Dos hojas verdaderas, CHV = Cuatro hojas verdaderas, SHV = Seis hojas verdaderas, RMC = Días a la ramificación, AP = Altura de la planta, DTP = Diámetro del tallo principal, Lpa = Longitud de la panoja, DP = Diámetro de la panoja, NDH = N° de dientes en la hoja, LMH = Longitud máxima de la hoja, AMH = Ancho máximo de la hoja, PN = Días a enpanojamiento, RDMO = Rendimiento.

estructurales explican gran parte de la variabilidad productiva en análisis multivariados.

La Dim2 se asoció principalmente con variables fenológicas, tales como días a enpanojamiento (PN), días a la ramificación (RMC) y los estados iniciales de desarrollo (HF, DHV, CHV y SHV) (Figura 4a). La orientación de estos vectores indica que el componente discrimina a los genotipos en función de su ritmo de desarrollo, separando materiales precoces de ciclos vegetativos más prolongados, criterio clave para la adaptación en ambientes altoandinos. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Maji y Shaibu (2012), quienes señalan que los caracteres fenológicos presentan alta capacidad discriminante en el ACP y permiten diferenciar genotipos según su patrón de desarrollo.

Las combinaciones de variedades mutantes con los insumos orgánicos Bocachi y humus de lombriz (Figura 4b) se proyectan preferentemente en el mismo sentido de los vectores productivos del Dim1 (Figura 4a), lo que evidencia una respuesta agronómica favorable. En contraste, el tratamiento testigo que se ubica más distante de estos vectores, reflejando una menor asociación con los caracteres productivos. El ACP identificó combinaciones de mayor relevancia agronómica como T14, T4, T13, T11 y, T27 (Tabla 2 y Figura 4) por su estrecha asociación con caracteres productivos clave (Figura 4a). Estos resultados confirman que la mutagénesis inducida, combinada con un manejo nutricional de suelo, genera variabilidad útil para la selección de genotipos promisorios para programas de fitomejoramiento de quinua (IAEA, 2025; Riaz y Gul, 2015).

### Análisis de varianza multivariante

El análisis de varianza multivariante (Tabla 5) reveló efectos significativos de los bloques ( $p=0.0057$ ), las variedades mutantes ( $p=0.0021$ ) y la interacción ( $p=0.0009$ ) sobre el conjunto de variables dependientes, mientras que el factor Insumos no presentó efecto significativo (0.2864). Estos resultados indican que la variabilidad multivariada

esta influenciada principalmente por los genotipos y su interacción con los insumos, evidenciando que la respuesta depende de la combinación de factores más que de efectos individuales. En este sentido, la significancia de la interacción resalta la importancia de evaluar conjuntamente los insumos y las variedades mutantes. Este comportamiento es consistente con lo descrito por Johson y Wichern (2007), donde se destaca la utilidad de los enfoques multivariados para analizar estructuras experimentales complejas para comprender mejor su influencia conjunta.

**Tabla 6.**

*Prueba Hotelling alfa = 0.05 para las variables en estudio en la caracterización de seis variedades mutantes*

Grupo	Trat	HF	DHV	CHV	SHV	RMC	AP	DTP	Lpa	DP	NDH	LMH	AMH	PN	RDTO	n	Agrupaciones
G-I	T26	4	6,3	7	9,3	17	60	1,3	18	5,9	20	4,6	3,7	74	3,5	3	B C
	T10	3,3	6,3	5,7	8	16	58	1,3	21	5	14	5,3	4	75	2,6	3	B C E F G I J
	T11	3,3	6,3	7	7	15	65	1,6	21	5,5	9,3	5,1	4,3	67	15	3	G
	T27	2,7	6,3	7,7	8	17	60	1,5	13	5,3	12	5,2	3,3	72	10	3	D E F G H I J
	T9	3,3	7	6,3	8	17	56	1,4	20	4	17	4,6	3,6	73	13	3	B
G-II	T24	4	6,7	7	9,7	17	29	1,1	13	4,4	10	3,2	2,8	88	4,6	3	B C J
	T25	4	6,7	6,7	8,3	17	33	1	5,5	3,2	10	3,2	2,8	78	1,1	3	I
	T12	4	6,3	7	8	17	30	1	13	4,5	7,7	3,7	2,4	75	3,2	3	F G H I J
	T17	2,7	6,7	6,3	9,3	17	35	0,8	13	3,4	7,7	4	1,8	94	1,1	3	E F G H I J
	T20	3,3	6	6,3	9,3	16	26	0,9	5,5	2,3	15	3,2	2,6	102	0,4	3	A C E F I J
	T16	2,7	6,3	7	8,3	17	26	1	5,7	2	11	3,5	2,4	89	5,6	3	E F G H I J
	T2	3,7	5,3	7	8,7	16	27	0,8	11	2,9	11	3,3	2,2	88	2,8	3	C D E F G H I J
	T3	2,7	5,7	6	7,3	16	30	0,8	10	4,1	12	3,7	2,5	85	3,8	3	D E F G H I
T1	3	5,7	6,3	7,7	15	38	1	11	3,5	9,7	4	3,1	83	7,6	3	D E F G H I J	
G-III	T14	2	6	8	7,7	16	47	1,1	15	5,4	15	4,4	3,5	98	7,3	3	A D
	T13	3,3	5,7	8,7	8,7	16	42	1,6	14	5,7	16	4,6	3,9	113	4,9	3	A
	T15	3,3	6	8,7	7	16	25	0,8	15	3,9	7,7	4,4	2,6	100	1,6	3	D H
	T5	3	5,7	8,3	7	17	28	0,9	19	2,8	11	4,3	2,8	93	2,4	3	D E F G H J
G-IV	T8	3,7	6,3	6,7	7,3	14	39	1,2	13	3,8	9,3	3,8	2,4	73	6,4	3	E F G H I J
	T7	3,7	6,7	7,3	9	14	44	1,1	16	3,4	10	4,4	3,9	85	6,3	3	B C J
	T22	4	6,7	9	7,7	14	31	0,9	3,3	2,4	12	3,8	3,1	86	3,2	3	H
	T23	4	6	8	8,3	15	30	0,9	11	3,9	16	4,2	3,7	84	0,4	3	C D F G H I J
	T6	3,7	6	7	7,3	14	31	0,9	10	3,5	14	3,7	3	88	0,5	3	D E F G H I J
	T19	3,3	6,7	6,7	7,7	17	31	1,1	8,5	2,3	17	4,7	3,7	88	5,4	3	E F G H I J
	T21	4,3	6	6,7	9,3	17	43	1,1	17	3,9	17	4,3	3,4	84	10	3	B C
	T18	3,3	6	6,3	8,3	17	35	0,9	12	4,3	14	4,3	3,6	90	9,4	3	C D E F G H I J
T4	4,3	5,3	7,7	5,7	16	57	1,1	7,2	2,8	15	4	2,8	76	16	3	E	

**Nota.** D.E = Desviación Estándar, E.E = Error experimental, Var(n-1) = Varianza, Min = Mínimo, Max = Máximo; HF = Dos hojas falsas, DHV = Dos hojas verdaderas, CHV = Cuatro hojas verdaderas, SHV = Seis hojas verdaderas, RMC = Días a la ramificación, AP = Altura de la planta, DTP = Diámetro del tallo principal, Lpa = Longitud de la panoja, DP = Diámetro de la panoja, NDH = N° de dientes en la hoja, LMH = Longitud máxima de la hoja, AMH = Ancho máximo de la hoja, PN = Días a enpanojamiento, RDTO = Rendimiento.

**Tabla 5.**

*Análisis de la varianza multivariante (wilks)*

F.V.	Estadístico	F	gl(num)	gl(den)	p
Bloques	0,33	2,1	28	78	0.0057**
A	0,5	1,17	28	78	0.2864ns
B	0,04	1,54	112	285	0.0021**
A*B	3,30E-3	1,43	224	445	0.0009**

**Nota.** F.V = Fuente de variación, A = Insumos, B = variedades mutantes, A\*B = interacción insumos\*variedades mutantes, F = Valor de Fisher, \*\* Altamente Significativo al 1% de probabilidad, gl: Grados de libertad, p-valor: valor de probabilidad.

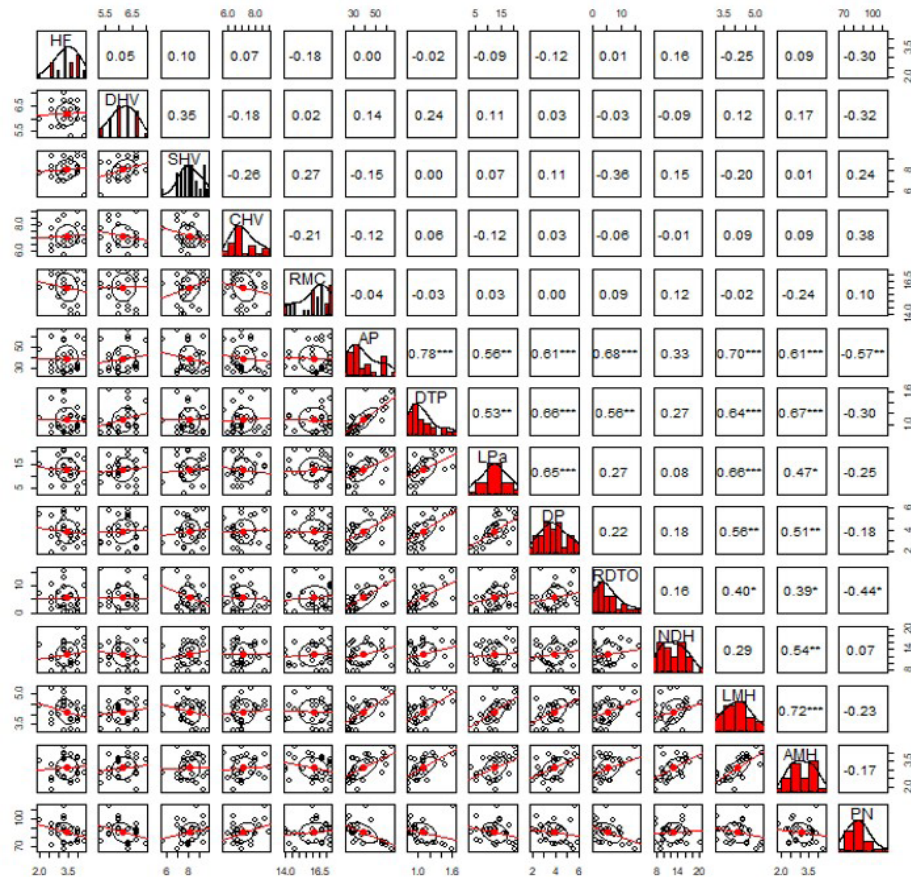
Para la comparación multivariada de medias se aplicó la prueba de (Hotelling, 1931) al ( $\alpha = 0.05$ ), la cual permitió identificar diferencias significativas entre tratamientos considerando simultáneamente múltiples variables correlacionadas, enfoque ampliamente recomendado en estudios de fitomejoramiento (Anderson, 2003; Johson y Wichern, 2007).

Los resultados (Tabla 6) evidencian la formación de cuatro grupos multivariados, reflejando patrones diferentes en la combinación de caracteres agronómicos. En particular, el grupo (G-III) que corresponden a los tratamientos T5, T14 caracterizados por valores elevados en variables asociadas al rendimiento (PN y RDTO) y componentes estructurales (CHV, SHV) lo que

sugiere un comportamiento agronomico favorable. De manera similar destaca el tratamiento T4 (G-IV) por presentar el mayor rendimiento, aunque con menor estabilidad en otras variables, indicando un desempeño sobresaliente.

Al respecto del T1 (G-II) muestran un comportamiento intermedio, con combinaciones balanceadas de caracteres, mientras que los grupos G-I y parte de G-II agrupan materiales con menor rendimiento o respuestas más heterogéneas. En conjunto, estos resultados indican que la superioridad agronómica no depende de una sola variable, sino de la integración multivariada de atributos, lo que respalda la selección de T5, T14 y T4 como genotipos promisorios bajo condiciones evaluadas.

**Figura 6.** Correlación de Pearson entre rasgos agronómicos y fisiológicos de 18 variables cuantitativas de las variedades mutantes de quinua M2gamma



**Nota.** Coeficientes de correlación (arriba de la diagonal), regresiones lineales (debajo de la diagonal) y distribución de rasgos (diagonal en color rojo). Valor p: 0,05\*, 0,01\*, 0,001\*\*\*; HF = Dos hojas falsas, DHV = Dos hojas verdaderas, CHV = Cuatro hojas verdaderas, SHV = Seis hojas verdaderas, RMC = Días a la ramificación, AP = Altura de la planta, DTP = Diámetro del tallo principal, Lpa = Longitud de la panoja, DP = Diámetro de la panoja, NDH = N° de dientes en la hoja, LMH = Longitud máxima de la hoja, AMH = Ancho máximo de la hoja, PN = Días a enpanojamiento, RDTO = Rendimiento

## Análisis de correlación múltiple

De acuerdo con los resultados, se evidenció una estructura de correlación entre las variables evaluadas con 20 coeficientes significativos (Figura 5), lo que confirma la interdependencia de los caracteres agronómicos. El rendimiento mostró correlaciones positivas con variables estructurales como la altura de planta ( $r = 0.68$ ), el diámetro de tallo ( $r = 0.56$ ) y el número de dientes en la hoja ( $r = 0.40$ ), lo que sugiere que un mayor desarrollo vegetativo favorece la capacidad fotosintética y el transporte de asimilados hacia los órganos reproductivos (Altieri et al., 2012; Bhargava et al., 2007; Tainz et al., 2014). Adicionalmente, se observaron asociaciones positivas entre la longitud máxima de la hoja y variables reproductivas como el diámetro ( $r = 0.56$ ) y la longitud de la panoja ( $r = 0.66$ ), evidenciando que el desarrollo foliar está estrechamente vinculado con la arquitectura reproductiva y el potencial productivo del cultivo (Altieri et al., 2012; Bhargava et al., 2007).

## Caracterización de variedades mutantes M2 según descriptores cualitativos

La caracterización cualitativa de las variedades mutantes de quinua (Figura 2 y Tabla 7) evidenció una clara diferenciación fenotípica entre los grupos de interés identificados, atribuible a la variabilidad inducida por mutagénesis.

El grupo G-I se caracterizó por un crecimiento arbustivo (96%), con ramificación hasta el tercio inferior (50%), tallo principal anguloso (85%), panojas de forma intermedia (62%) y densidad compacta (44%), rasgos asociados a una arquitectura vegetal estable y de interés agronómico. En este grupo se registró una incidencia de daño por aves del (13%), relacionada con la exposición de las panojas compactas. El grupo G-IV presentó mayoritariamente crecimiento herbáceo (56%), con hábito ramificado simple (69%) y panoja principal no definida, tallo anguloso (91%) y panojas intermedias (41%) de densidad laxa (57%), lo que sugiere una arquitectura reproductiva menos compacta.

**Tabla 7.**

*Distribución de frecuencia de variedades mutantes M2 descriptor*

Descriptor y Detalle		Categoría	G-I	G-II	G-III	G-IV
TC (Tipo de crecimiento)	Arbustivo (%)		96	49	69	44
	Herbáceo (%)		4	51	31	56
HC (Hábito de crecimiento)	Ramificado hasta el segundo tercio (%)		30	21	19	9
	Ramificado hasta el tercio inferior (%)		50	41	35	15
	Simple (%)		20	21	45	69
	Ramificado con panoja principal no definida (%)		0	1	0	7
FTP (Forma del tallo principal)	Anguloso (%)		85	58	90	91
	Cilíndrico (%)		15	42	10	9
PR (Presencia de ramificación)	Ausente (%)		92	48	49	45
	Presente (%)		8	52	51	55
FP (Forma de la panoja)	Amarantiforme (%)		4	5	14	26
	Glomerulada (%)		34	44	23	33
	Intermedia (%)		62	51	63	41
Dpa (Densidad de panoja)	Compacta (%)		44	16	32	27
	Intermedia (%)		23	40	33	16
	Laxa (%)		33	44	35	57
DPA1 (Daño por Aves)	Si (%)		13	14	52	15
	No (%)		87	86	48	85

**Nota.** Elaborado con base a descriptores (Bioversity International et al., 2013)

Asimismo, se observó presencia de daño por aves del (15 %), similar a la del grupo G-I y mayor presencia de daño por aves en el grupo (G-III) con (52%).

## CONCLUSIONES

El estudio demostró que el comportamiento agronómico de las variedades mutantes de quinua M2 en comparación con los testigos, una alta variabilidad fenológica y morfológica, confirmando su alta variabilidad entre testigos y variedades mutantes de quinua M2. Se identificó variedades mutantes M2 con características superiores en rendimiento y adaptación clasificados en cuatro grupos, destacándose el grupo G-I por presentar mejor desempeño agronómico. Este grupo registró mayor altura promedio (59.8 cm), mayor diámetro del tallo principal (1.41 cm), mayor longitud de panoja (18.5 cm) y mayor rendimiento promedio (8.95 g planta<sup>-1</sup>), además de mayor precocidad (72.13 días a enpanojamiento) en comparación con los demás grupos. Asimismo, el análisis de componentes principales mostró que las variables altura de planta, longitud y diámetro de panoja y rendimiento explicaron el 34.23% de la varianza total (Dim1), evidenciando su importancia para la diferenciación de genotipos superiores. Además, la prueba multivariada de Hotelling ( $\alpha = 0.05$ ) identificó como materiales promisorios a las combinaciones Testigo\*M214A (G-II), Testigo\*M223A (G-IV) y el grupo (G-III) que corresponden a los tratamientos Bocachi\*M28A, Humus de lombriz\*M26A, por su estrecha asociación con caracteres productivos clave. Combinaciones que alcanzaron rendimientos individuales de hasta 16 g planta<sup>-1</sup>, diámetros de panoja superiores a 4.0 cm y diámetros de tallo mayores a 1.30 cm.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Recursos Naturales (IIAR-EN).

## BIBLIOGRAFIA

- Ahloowalia, B., Maluszynski, M., y Nichterlein, K. (2004). Global impact of mutation-derived varieties. *Euphytica* 2004, 135(2), 187–204. <https://doi.org/10.1023/B:EU-PH.0000014914.85465.4F>
- Altieri, M. A., Funes-Monzote, F. R., y Petersen, P. (2012). Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Journal Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6>
- Álvarez, A., Morales, C., Avendaño, C., Corrales, R., Villarreal, F., Santellano, E., y Gómez, Y. (2019). Dosis letal media (DL 50 ) y reducción de crecimiento (GR 50 ) por irradiación gamma en pasto garrapata (*Eragrostis superba*). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(1), 227–238. <https://doi.org/10.22319/RMCP.V10I1.4327>
- Anderson, T. W. . (2003). *An introduction to multivariate statistical analysis*. 721. <https://www.wiley.com/en-us/An+Introduction+to+Multivariate+Statistical+Analysis%2C+3rd+Edition-p-9780471360919>
- Balvoa, S., Heredia, M., Gualapuro, M., y Yanchapanta, V. (2021). *La radiación ionizante gamma y usos actuales en ciencias agrícolas, oportunidades para los cultivos andinos: Breve revisión*. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i6.2761>
- Bhargava, A., Shukla, S., y Ohri, D. (2007). Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 101(1), 104–116. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2006.10.001>
- Biodiversity International, FAO, PROINPA, INIAF, y FIDA. (2013). *Descriptorios para quinua (Chenopodium quinoa Willd.) y sus parientes silvestres*. Biodiversity International. <https://hdl.handle.net/10568/72610>
- Campos, J., Acosta, K., y Paucar, L. M. (2022). Quinoa (*Chenopodium quinoa*): Composición nutricional y Componentes bioactivos del grano y la hoja, e impacto del tratamiento térmico y de la germinación. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 209–220. <https://doi.org/10.23857/scientia.v13n3.209-220>

- [org/10.17268/sci.agropecu.2022.019](https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.019)  
Canales, N., Gomez, J., Fielding, M., y Dugarte, M. (2020). *Potencial de la quinua en la bioeconomía de Bolivia*. Stockholm Environment Institute, 1–16. <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2020/04/200331ortiz-canales-quinua-bolivia-wp-spanishvf.pdf>
- Cooper, M., y DeLacy, I. H. (1994). Relationships among analytical methods used to study genotypic variation and genotype-by-environment interaction in plant breeding multi-environment experiments. *Theoretical and Applied Genetics*, 88(5), 561–572. <https://doi.org/10.1007/BF01240919/METRICS>
- Erazo, J., Martínez, R., Naranjo, E., y Albuja, J. (2024). Metodologías del Diseño Experimental en Procesos Industriales: Un análisis teórico. *Polo Del Conocimiento*, 9(7), 2758–2787. <https://doi.org/10.23857/pc.v9i7.7665>
- FAO. (2023a). Food and Agriculture Organization Statistical Database. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- FAO. (2023b). Quinoa. *FAO Publications Catalogue* 2023. <https://doi.org/10.4060/CC7285EN>
- Fernández, L., Rangel, L., Varela, M., Pino, A., Pozo, J., y Lim, N. (2021). Análisis de componentes principales, una herramienta eficaz en las Ciencias Técnicas Agropecuarias. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(1), 1–6. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542022000100010&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542022000100010&script=sci_arttext)
- Friedrich, T. (2014). La seguridad alimentaria: retos actuales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 48, 319–322. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193033033001>
- Gabriel, Dr. J., Ganchozo, Dra. B. I., Valverde, Ing. A., y Piguave, Ing. C. C. (2017). DISEÑOS EXPERIMENTALES: Teoría y práctica para experimentos agropecuarios. <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/116>
- García, M. Á., Amado, J. L., y Hernández, J. C. (2024). Capacidad fotosintética, fenología, rendimiento y composición química de semillas de tres cultivares de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 18(2), 2. <https://doi.org/10.17584/rcch.2024v18i2.17524>
- Gaur, M., Yadav, S., Soni, A., Tomar, D., Jangra, A., Joia, S., Kumar, A., Mehra, R., y Trajkovska Petkoska, A. (2025). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): nutritional profile, health benefits, and sustainability considerations. *Discover Food* 2025 5:1, 5(1), 172-. <https://doi.org/10.1007/S44187-025-00470-Y>
- Hotelling, H. (1931). The Generalization of Student's Ratio. *The Annals of Mathematical Statistics*, 2(3), 360–378. <https://doi.org/10.1214/AOMS/1177732979>
- IAEA. (2025). *Base de datos de variedades mutantes*. International Atomic Energy Agency. <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Home.aspx>
- Jacobsen. (2011). The Situation for Quinoa and Its Production in Southern Bolivia: From Economic Success to Environmental Disaster. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(5), 390–399. <https://doi.org/10.1111/J.1439-037X.2011.00475.X/FULL>
- Johson, R., y Wichern, D. (2007). Applied Multivariate Statistical Analysis (J. Wendelken, Ed.; 6th ed.). I Assistant/Print Supplements. <http://staff.ustc.edu.cn/~ynyang/vector/books/Johnson-Wichern-ENG.pdf>
- Kim, S. M., Jo, Y. D., Chun, J. I., Kim, J. B., y Kang, J. H. (2021). Chronic gamma irradiation changes phenotype and gene expression partially transmitted to next-generation tomato seedlings. *Agronomy*, 11(8), 1638. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11081638/S1>
- Maji, A., y Shaibu, A. (2012). Application of principal component analysis for rice germplasm characterization and evaluation. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 4(6), 87–93. <https://doi.org/10.5897/JPBCS11.093>
- NASA. (2025). NASA POWER | Data Access Viewer (DAV). <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

- Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H. A., Miah, G., y Usman, M. (2016). Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: A review. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 30(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1087333>:REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:TBEQ20:WGROU:STRING:PUBLICATION
- Olivoto, T., Diel, M. I., Schmidt, D., y Lúcio, A. D. (2022). MGIDI: a powerful tool to analyze plant multivariate data. *Plant Methods* 2022 18:1, 18(1), 121-. <https://doi.org/10.1186/S13007-022-00952-5>
- Pathan, S., Siddiqui, R. A., Pathan, S., y Siddiqui, R. A. (2022). Nutritional Composition and Bioactive Components in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Greens: A Review. *Nutrients* 2022, Vol. 14, 14(3). <https://doi.org/10.3390/NU14030558>
- Riaz, A., y Gul, A. (2015). *Plant Mutagenesis and Crop Improvement. Crop Production and Global Environmental Issues*, 181–209. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_8)
- Riviello-Flores, M. de la L., Cadena-Iñiguez, J., Ruiz-Posadas, L. D. M., Arévalo-Galarza, M. de L., Castillo-Juárez, I., Hernández, M. S., y Castillo-Martínez, C. R. (2022). Use of Gamma Radiation for the Genetic Improvement of Underutilized Plant Varieties. *Plants*, 11(9), 1161. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11091161>
- Rojas, W. (2003). *Análisis de la variabilidad genética en quinua. Boletín Técnico IPGRI* No. 8., 30. <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/40ad97cf-daba-48d0-a80f-2b1d9803c738/content>
- Tainz, L., Zeiger, E., Max, I., y Murphy, A. (2014). *Plant Physiology and Development* (A. Sinauer, Ed.; 6th ed.). *Plant physiology*. <https://biologywala.com/wp-content/uploads/2021/06/compressed-6th-ed.-Plant-Physiology-by-Lincoln-Taiz-Eduardo-Zeiger-biologywala.com-compressed.pdf>
- Umesh, M. R., Angadi, S., Gowda, P., Ghimire, R., y Begna, S. (2019). Climate-Resilient Minor Crops for Food Security. *Agronomic Crops: Volume 1: Production Technologies*, 19–32. [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9151-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9151-5_2)
- Vilcacundo, R., y Hernández, B. (2017). Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Current Opinion in Food Science*, 14, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2016.11.007>
- Winkel, T., Aguirre, M. G., Arizio, C. M., Ascherro, C. A., del Pilar Babot, M., Benoit, L., Burgarella, C., Costa-Tártara, S., Dubois, M. P., Gay, L., Hocsman, S., Jullien, M., López-Campeny, S. M. L., Manifesto, M. M., Navascués, M., Oliszewski, N., Pintar, E., Zenboudji, S., Bertero, H. D., y Joffre, R. (2018). *Discontinuities in quinoa biodiversity in the dry Andes: An 18-century perspective based on allelic genotyping*. PLoS ONE, 13(12), e0207519. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0207519>

Artículo recibido en: 20 de abril del 2026

Aceptado en: 27 de abril del 2026