

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA RADICULAR EN QUINOA (*CHENOPODIUM*
QUINOA WILLD.) BAJO DIFERENTES DISPONIBILIDADES HIDRICAS**

POR

ALEJANDRO PATRICIO MEDINA CASTRO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2026**

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA RADICULAR EN QUINOA (*CHENOPODIUM*
QUINOA WILLD.) BAJO DIFERENTES DISPONIBILIDADES HIDRICAS**

POR

ALEJANDRO PATRICIO MEDINA CASTRO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2026**

Aprobada por:

Profesor Asistente, Abdelhalim Khaled E.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

Guía

Investigador, Felix Estrada B.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.
Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

Co-guía

Profesor Asistente, Miguel Garriga C.
Biólogo, Dr. Cs.

Asesor

Profesor Asociado, Manuel Faúndez S.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary	1
Introducción	2
Materiales y Métodos	4
Resultados y Discusión	8
Conclusiones	17
Referencias	19
Apéndices	22

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1	11
Figura 2	12
Figura 3	14
Figura 4	15
Tabla 1	5
Tabla 2	6
Tabla 3	16

ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA RADICULAR EN QUINOA (*CHENOPODIUM QUINOA* WILLD.) BAJO DIFERENTES DISPONIBILIDADES HIDRICAS

STUDY OF ROOT STRUCTURE IN QUINOA (*CHENOPODIUM QUINOA* WILLD.) UNDER DIFFERENT WATER AVAILABILITIES

Palabras claves: Biomasa aérea, disponibilidad hídrica, estructura radicular, morfología radicular, plasticidad fenotípica.

RESUMEN

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) destaca por su calidad nutricional y su adaptación a entornos adversos, siendo un cultivo vital ante la escasez hídrica en Chile. Este estudio analizó el rendimiento de grano (RG), la biomasa aérea (BA) y la estructura y morfología radicular de 13 genotipos de quinoa bajo condiciones de riego y seco durante la temporada 2024-2025. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, midiendo variables radicales y agronómicas en la etapa de grano lechoso y a la cosecha. El ambiente fue el factor crítico: el seco redujo el RG en un 55 % y la BA en un 45 % debido al estrés hídrico y a las características del suelo granítico. La ausencia de interacción Sitio × Genotipo para RG y BA demuestra una adaptabilidad amplia, indicando que los genotipos superiores mantienen su jerarquía en ambos entornos. No obstante, la altura de planta y los días a floración mostraron una interacción significativa, confirmando la plasticidad fenotípica como estrategia adaptativa. Aunque el estrés contrajo los parámetros radicales entre un 35 % y 40 %, la respuesta fue alométrica y uniforme entre genotipos. Un hallazgo clave fue la correlación negativa ($r = -0,34$) entre la profundidad radicular y el RG en seco, revelando un compromiso energético: la inversión en raíces profundas limita el llenado de grano. Estos resultados definen criterios de selección para optimizar la eficiencia del cultivo ante el cambio climático.

SUMMARY

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) stands out for its nutritional quality and adaptation to adverse environments, making it a vital crop in the face of water scarcity in Chile. This study analyzed the grain yield (GY), aboveground biomass

(AB), and root structure and morphology of 13 quinoa genotypes under irrigated and rainfed conditions (2024–2025 season). A randomized complete block design was used, measuring root and agronomic variables at the milky grain stage and at harvest. The environment was the critical factor: rainfed conditions reduced GY by 55 % and AB by 45 % due to water stress and granitic soil constraints. The lack of a Site × Genotype interaction for GY and AB demonstrates broad adaptability, where superior genotypes maintain their ranking across both environments. However, plant height and days to flowering showed significant interaction, confirming phenotypic plasticity as an adaptive strategy. Although stress reduced root parameters by 35–40 %, the response was allometric and uniform across genotypes. A key finding was the negative correlation ($r = -0,34$) between root depth and GY under rainfed conditions, revealing an energetic trade-off: investment in deep roots limits grain filling. These results define selection criteria to optimize crop efficiency in the context of climate change.

INTRODUCCIÓN

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), pertenece a la familia de las amaranthaceae, es un pseudocereal de origen sudamericano el cual fue domesticado hace más de 7.000 años. Se le considera un pseudocereal por su morfología y utilización pese a no ser una gramínea. La quinoa destaca por contener proteínas de alto valor biológico, con todos los aminoácidos esenciales, además de ser una fuente importante de minerales como hierro, calcio y zinc, así como compuestos antioxidantes (Bazile *et al.*, 2016).

Pseudocereal que destaca por su alta resiliencia ante condiciones agroclimáticas adversas como la salinidad, suelos pobres, heladas y escasez hídrica (Bazile *et al.*, 2016; Jacobsen *et al.*, 2006) además de poder adaptarse a diferentes condiciones agroclimáticas, desde zonas costeras y valles interandinos con altitudes sobre los 4.000 m.s.n.m y precipitaciones inferiores a 250 mm anuales (Bertero *et al.*, 2004a; Ruiz *et al.*, 2014). Esta capacidad hace que la quinoa sea reconocida como un cultivo estratégico para enfrentar el efecto del cambio climático y la creciente inseguridad alimentaria a nivel mundial (FAO,2013).

En Chile la quinoa se encuentra principalmente en la zona centro-sur, donde existen variedades locales las cuales se adaptan a condiciones de secano y suelos marginales (INIA, 2018), La quinoa posee una diversidad genética expresada en distintos ecotipos como los de grupo "salares", con raíces más profundas y densas, y ecotipos de "costa" los cuales poseen raíces más superficiales y mayor ramificación (León -Lobos *et al.*, 2018).

En condiciones de estrés hídrico el sistema radicular de la quinoa cumple un rol fundamental en la absorción de agua y nutrientes, raíz que se caracteriza por tener una arquitectura tipo "espina de pescado" (herringbone), una raíz primaria pivotante y raíces laterales bien desarrolladas, lo que favorece una mayor exploración del perfil del suelo (Hinojosa *et al.*, 2018; Ruiz *et al.*, 2014).

Varios estudios demuestran que la quinoa presenta plasticidad radicular, logrando presentar modificaciones en longitud, grosor y biomasa radicular como respuesta a condiciones limitantes de humedad (Kumar *et al.*, 2021; García *et al.*, 2020). Álvarez-Flores *et al.* (2018) demostraron que la quinoa exhibe un crecimiento acelerado de la raíz pivotante en condiciones de suelo seco, con segmentos radiculares más largos, gruesos y numerosos en ecotipos adaptados a hábitats áridos. En términos cuantitativos, estudios comparativos entre cultivares han documentado diferencias significativas: los cultivares Rosada y Black mostraron longitudes radiculares de 16,2 cm y 17,3 cm, diámetros de 0,66 mm y 0,46 mm, y volúmenes de 8,3 cm³ y 5,3 cm³, respectivamente, indicando una mejor penetración y expansión radicular bajo condiciones de aridez (Shirali *et al.*, 2023). Singh *et al.* (2021) reportaron que, bajo escasez de agua, las plantas de quinoa tienden a desarrollar raíces extendidas con incrementos significativos en la biomasa radicular. Adicionalmente, se han documentado cambios en la topología radicular hacia arquitecturas de tipo herringbone, que optimizan la exploración del suelo con menor costo energético (Singh *et al.*, 2021).

Frente a un escenario mundial marcado por la disminución en la disponibilidad hídrica y la necesidad de desarrollar cultivos más eficientes, resulta fundamental poder comprender las respuestas morfológicas del sistema radicular de la quinoa en diferentes condiciones hídricas, existen varios estudios enfocados en variables

aéreas como el rendimiento, índice de cosecha o eficiencia del uso de agua, dejando en segundo plano el análisis detallado del sistema radicular (Hinojosa *et al.*, 2018). Siendo fundamental comprender el comportamiento de las raíces frente a distintas condiciones hídricas para poder identificar y seleccionar los genotipos con mayor eficiencia a la hora de captar agua, especialmente frente a los escenarios de escases hídrica actuales.

El presente estudio tiene como propósito caracterizar la respuesta de la biomasa aérea (BA), sus componentes, y la estructura y morfología del sistema radicular en diferentes genotipos de quinoa cultivados bajo condiciones contrastantes de disponibilidad hídrica (riego en Santa Rosa y secano en Cauquenes). Sus objetivos específicos son evaluar las respuestas de los rasgos de biomasa aérea y radicales en trece genotipos de quinoa sometidos a dos niveles de disponibilidad hídrica, y analizar la relación entre los rasgos radicales y los de biomasa aérea para determinar cómo las características del sistema radical influyen en la producción de biomasa aérea y en el rendimiento de granos (RG).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales y condiciones edafoclimáticas:

El experimento se llevó a cabo durante la temporada agrícola 2024-2025 en dos localidades de la zona centro-sur de Chile, ambas pertenecientes al instituto de investigaciones Agropecuarias (INIA). Cauquenes: (35°58' S, 72°17' O; 177 m s.n.m.) lugar que representa un ambiente de secano, caracterizado por condiciones de estrés hídrico (EH), dado por su bajo índice de precipitaciones con un régimen inestable y escaso (Tabla 1), el suelo de la localidad corresponde a un tipo de suelo granítico (Ultic palexeralfs) con un pH de 5,7 (1:2.5 en agua) y un contenido de materia orgánica del 2,7 % en los primeros 20 cm (Apéndice 1). Santa Rosa: (36°32' S, 71°55' O; 220 m s.n.m.) lugar que presenta un ambiente de riego completo con buena disponibilidad hídrica debido a la combinación de precipitaciones y riego suplementario, el suelo de la localidad corresponde a un tipo de suelo de la serie Andisol con un pH de 5,8 y un 14,9 % de materia orgánica (Apéndice 2).

Los tratamientos de riego se establecieron según la disponibilidad de agua de cada localidad. En Cauquenes, los genotipos se desarrollaron bajo condiciones de secano, lo que implica la nula aplicación de riego y dependencia total a las precipitaciones naturales, encontrándose frente a una situación de déficit hídrico común de la zona de Cauquenes del secano interior. En Santa Rosa, los genotipos se desarrollaron bajo condiciones de riego óptimo (Precipitaciones + 6 riegos suplementarios por surco de ~50 mm por riego desde noviembre hasta enero) por lo cual se aseguró un suministro hídrico durante todo su ciclo con el fin de conseguir un alto potencial productivo (Tabla 1).

Material vegetal

Se utilizaron trece genotipos y líneas avanzadas de quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) del programa de mejoramiento genético de quinoa (INIA-Rayentué) con distintas fenologías (detalles en Tabla 2).

Tabla 1. Datos climáticos en las estaciones experimentales de INIA-Santa Rosa (Ñuble) y INIA- Cauquenes (Maule), durante el ciclo 2024/2025.

Sitio	Mes	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Tpro (°C)	Hr (%)	Eto (mm)	PPT (mm)	Riego sup (mm)
Santa Rosa	Sep	3,5	16,1	9,8	90,5	51,0	105,6	0
	Oct	6,8	21,3	14,1	89,9	86,7	22,8	0
	Nov	6,9	23,0	15,0	81,0	114,9	20,9	100
	Dic	9,0	27,4	18,2	74,4	154,0	0,6	100
	Ene	9,8	31,0	20,4	68,7	156,7	0,0	100
	Feb	9,0	30,1	19,5	68,2	125,6	0,2	0
Cauquenes	Sep	3,4	17,5	10,4	73,4	54,8	40,5	0
	Oct	6,9	22,8	14,9	70	87,0	5,9	0
	Nov	7,2	24,5	15,9	60,2	118,2	11,3	0
	Dic	9,4	28,9	19,1	51,9	158,4	0,0	0
	Ene	11,0	32,3	21,6	46,7	162,3	0,0	0
	Feb	-	-	-	-	-	-	-

*Fuente: Agrometeorología INIA (2025). Tmin, temperatura mínima, Tmax, temperatura máxima, Tpro, temperatura promedio, Hr, humedad relativa, PPT, Precipitaciones, Riego sup, Riego suplementario

Diseño experimental y manejo agronómico

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con cuatro repeticiones por tratamiento en cada localidad. Cada unidad

experimental consistió en una parcela de 4 hileras de 4 metros de largo las cuales estaban separadas por 0,5 metros entre hileras dando una superficie de 8 metros cuadrados por parcela. La siembra se realizó el 5 de septiembre de 2024. En el presente ensayo se utilizó una dosis de siembra de 15 kg ha⁻¹. La fertilización a la siembra consistió en la aplicación de 261 kg ha⁻¹ de S.F.T (superfosfato triple), equivalente a 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Anhídrido fosfórico), complementada con 100 kg ha⁻¹ de muriato de potasio, aportando 60 kg ha⁻¹ de KCl (cloruro de Potasio). El manejo del nitrógeno se realizó en dos etapas fenológicas: en el estado de 4 a 5 hojas se aplicaron 166 kg ha⁻¹ de urea (75 unidades de N ha⁻¹), repitiéndose la dosis en el estadio de 5 a 6 hojas, con igual cantidad y concentración de nitrógeno (N). Esta estrategia de nutrición busca optimizar el desarrollo inicial del cultivo y maximizar el aprovechamiento de los nutrientes en las etapas clave de crecimiento. El manejo agronómico (control de malezas y sanidad) fue aplicado de manera homogénea en ambas localidades conforme a las recomendaciones técnicas de INIA para el cultivo de quinoa.

Tabla 2. Serial, nombre, año de liberación, tipo y fenología de los genotipos de quinoa bajo estudio.

Serial	Nombre	Año de liberación	Tipo	Fenología
G1	AZ-1	Línea - INIA	Línea pura	Granos blancos
G2	AZ-2	Línea - INIA	Línea pura	Granos blancos
G3	AZ-3	Línea - INIA	Línea pura	Granos blancos
G4	CAUQUENES	Línea - INIA	Línea pura	Granos blancos
G5	Chenn0046	Línea - INIA	Línea pura	Granos blancos
G6	FARO	Línea - INIA	Línea pura	Granos blancos
G7	KURU	2025- INIA	Línea pura	Granos rojos
G8	MAUKA	2025- INIA	Línea pura	Granos beige
G9	NEGRITA	Línea - INIA	Línea pura	Granos negros
G10	P. MORADA	Línea - INIA	Línea pura	Granos blancos
G11	REGALONA	2001 -Baer	Híbrido	Granos blancos
G12	TEMUCO 22	Línea - INIA	Línea pura	Granos blancos
G13	TEMUCO 9	Línea - INIA	Línea pura	Granos blancos

Evaluación de la estructura y morfología radicular

El estudio se realizó durante la etapa de grano lechoso, periodo en el que el crecimiento radicular alcanza su máxima expresión. Para evitar el efecto borde, las plantas se seleccionaron al azar únicamente de las hileras centrales. Se extrajeron manualmente cuatro muestras de raíces por parcela, utilizando una pala agrícola con dimensiones de 30 cm de profundidad y 20 cm de ancho. Las raíces recolectadas fueron lavadas inicialmente con agua corriente, luego enjuagadas con agua destilada y secadas superficialmente con toallas de papel. Posteriormente, se conservaron en etanol al 40 % (v/v) y se almacenaron a 4 °C hasta el momento de su análisis.

Previo al escaneo, se determinó el volumen de las raíces (VR, ml) mediante el desplazamiento de agua en una probeta, y la profundidad máxima (PR, cm) o longitud máxima de cada raíz se midió con una regla. Para el escaneo, las raíces se distribuyeron cuidadosamente con pinzas sobre una bandeja de vidrio transparente (0,29 m x 0,42 m), cubierta con una lámina de agua destilada de 0,02 m, minimizando el solapamiento de los segmentos radiculares.

La bandeja se colocó dentro de una caja negra diseñada específicamente para esta investigación (véase Apéndice 3), cuya base incluía iluminación LED que proporcionaba un fondo blanco para resaltar las raíces.

Una cámara Canon PowerShot SX620 HS, instalada en un orificio en la parte superior de la caja, capturó imágenes en formato BMP, a color, con una resolución de 300 dpi.

La longitud total de las raíces (LTR) se determinaron posteriormente a partir de las imágenes digitales utilizando el software de acceso abierto EZ-Rhizo (<http://www.psrg.org.uk/Rhizo-II.htm>).

Finalmente, los segmentos radiculares fueron secados en sobres de papel a 60 °C durante 48 horas, y se evaluó la biomasa seca total de la raíz (PSTR). La longitud específica de la raíz (LER, m g⁻¹) se calculó como la relación entre la (LTR) y la PSTR, según Ryser (2006):

$$\text{LER} = \text{LTR} / \text{PSTR}.$$

Evaluaciones agronómicas

Se registraron los días transcurridos desde la siembra hasta la floración (DF). La cosecha, con una humedad de grano entre 14% y 16 %, se realizó de forma temprana en Cauquenes, aproximadamente el 15 de enero de 2025. En cambio, en Santa Rosa demoró casi 26 días adicionales, ocurriendo en la segunda semana de febrero.

Durante la madurez fisiológica (cuando la humedad del grano alcanzó el 34%), se midió la altura de la planta (AP) desde el nivel del suelo hasta la punta más alta de la panoja utilizando una regla. Se determinó el número de plantas por metro lineal (NP) en dos hileras centrales de cada parcela, y posteriormente se registraron sus BA. El RG se estimó mediante la cosecha de 2 metros lineales de las dos hileras centrales por parcela. Posteriormente, los datos de producción de BA, NP y RG fueron extrapolados por hectárea.

Análisis estadístico

El análisis del genotipo x ambiente se llevará a cabo mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el modelo lineal general (GLM) en Statgraphics Centurion Versión 18.1.12. Se considerarán como efectos aleatorios tanto las réplicas y como la interacción Sitio x Genotipo. Para explorar las relaciones entre los diferentes caracteres evaluados, se emplearán análisis de regresión.

Las comparaciones de medias entre genotipos se realizarán mediante la prueba de Duncan. La elaboración de las figuras (comparaciones de rasgos) se efectuará utilizando Excel 365 para Windows (Microsoft Corp., EE. UU.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desempeño agronómico y estabilidad del rendimiento

El análisis de varianza reveló que el Sitio (Ambiente) fue el factor determinante principal para la mayoría de las variables agronómicas (Apéndice 4). La reducción significativa del RG y la BA en Cauquenes respecto a Santa Rosa (Figura 2A y B) confirma la sensibilidad de la quinoa a la disponibilidad hídrica, a pesar de su reconocida rusticidad (Jacobsen, 2006).

La BA mostró diferencias significativas entre Sitios y Genotipos. En Santa Rosa, los valores oscilaron entre 2,5 y 7,8 t ha⁻¹, destacando los genotipos MAUKA y P.

MORADA. En Cauquenes, la BA fue consistentemente menor (1,6 a 2,6 t ha⁻¹), siendo AZ-1 y CAUQUENES los genotipos con tendencia a una mayor acumulación, aunque sin diferencias significativas con el resto. La reducción promedio de BA en Cauquenes fue del 45 %, evidenciando el efecto limitante del estrés hídrico (Bazile *et al.*, 2016).

El RG presentó un patrón similar. En Santa Rosa (0,12 a 1,6 t ha⁻¹), destacaron AZ-1, AZ-2, CHENN0046 y P. MORADA. Por el contrario, el genotipo Negrita mostró un rendimiento muy bajo (0,12 t ha⁻¹) en esta localidad, debido a una menor competencia con las malezas derivada de su fenología tardía. En Cauquenes, los rendimientos oscilaron entre 0,27 y 0,71 t ha⁻¹, con FARO y P. MORADAS presentando los mejores desempeños. La reducción promedio del RG en Cauquenes fue del 55% (Geerts *et al.*, 2008).

El IC exhibió menor variación entre localidades (Figura 2C). En Santa Rosa, el IC varió entre 6 % y 41 %, mientras que en Cauquenes osciló entre 14,6 % y 29 %. Los genotipos AZ-1, AZ-2, AZ-3 y FARO mostraron altos IC en ambas localidades, sugiriendo una mayor eficiencia en la partición de fotoasimilados hacia el grano.

Un hallazgo crucial de este estudio fue la ausencia de una interacción significativa Sitio x Genotipo para la BA y el RG ($P = 0,076$ y $P = 0,188$, respectivamente; Apéndice 4). Según Yan y Kang (2002), la falta de interacción significativa sugiere que el orden de mérito de los genotipos se mantiene relativamente constante a través de los ambientes evaluados. Esto indica que los genotipos de alto rendimiento bajo riego óptimo (Santa Rosa) tienden a ser también los superiores bajo condiciones de secano (Cauquenes), lo que sugiere una adaptabilidad amplia en el germoplasma evaluado, en lugar de una adaptación específica a condiciones de estrés severo (Zurita-Silva *et al.*, 2014).

Plasticidad fenotípica en rasgos morfológicos y fenológicos de la biomasa área

El NP mostró diferencias significativas entre sitios. Santa Rosa presentó densidades menores (promedio de 927 mil plantas ha⁻¹), mientras que Cauquenes registró valores más altos (promedio de 1180 mil plantas ha⁻¹). La menor densidad observada en Santa Rosa podría atribuirse a una menor competencia con malezas,

mientras que en Cauquenes la menor presión de malezas permitió que los genotipos expresaran su potencial de emergencia antes del inicio del periodo de estrés hídrico.

Los días a floración (DF) mostraron que el genotipo KURU fue el más precoz, mientras que MAUKA presentó el ciclo más largo en los dos sitios (Figura 3B). La alta significancia del factor Genotipo (Apéndice 4) confirma la existencia de polimorfismos funcionales en genes de respuesta térmica y fotoperiódica (Bertero *et al.*, 2004b).

La AP se redujo en un 30% en Cauquenes (49,1 –68,4 cm) en comparación con Santa Rosa (79,1–116,6 cm). Esta reducción refleja una respuesta adaptativa para optimizar el uso del agua (Razzaghi *et al.*, 2011).

Se observó en Apéndice 1 una interacción Sitio x Genotipo altamente significativa para la AP ($P < 0,001$) y significativa para los DF ($P < 0,05$). Este resultado sugiere que los mecanismos de adaptación de la quinoa residen en su plasticidad fenotípica para modificar su arquitectura y fenología en respuesta al estrés (Bertero *et al.*, 2004a).

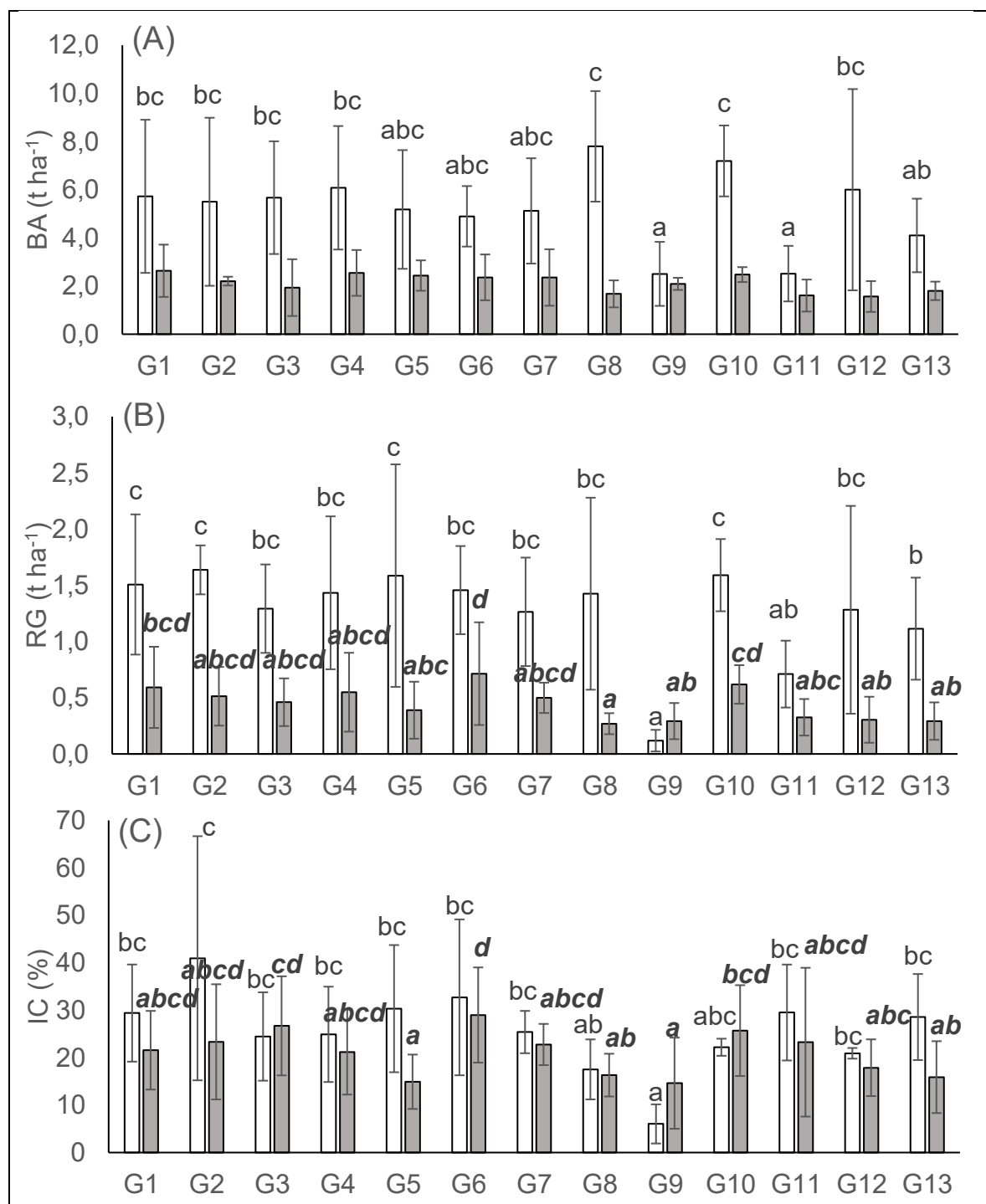
La variabilidad en la respuesta de la altura y la fenología indica que distintos genotipos activan estrategias diferenciales, como el escape a la sequía mediante el adelantamiento de la floración o la restricción del crecimiento vegetativo, para asegurar la reproducción bajo déficit hídrico (Choukr-Allah *et al.*, 2016).

Respuesta conservada del sistema radicular

En cuanto a los rasgos radiculares (Apéndice 5), el análisis mostró un fuerte efecto del sitio ($P < 0,001$ para la mayoría de las variables), pero una ausencia de efecto del genotipo (excepto para el peso seco radicular) y de interacción Sitio x Genotipo. Esto sugiere que los rasgos radiculares en estos 13 genotipos responden al ambiente de manera alométrica y conservada; es decir, aunque la deficiencia hídrica altera el volumen, la profundidad, la longitud y la longitud específica de la raíz (Figuras 4 y 5), todos los genotipos modifican su sistema radicular en una magnitud y dirección similares.

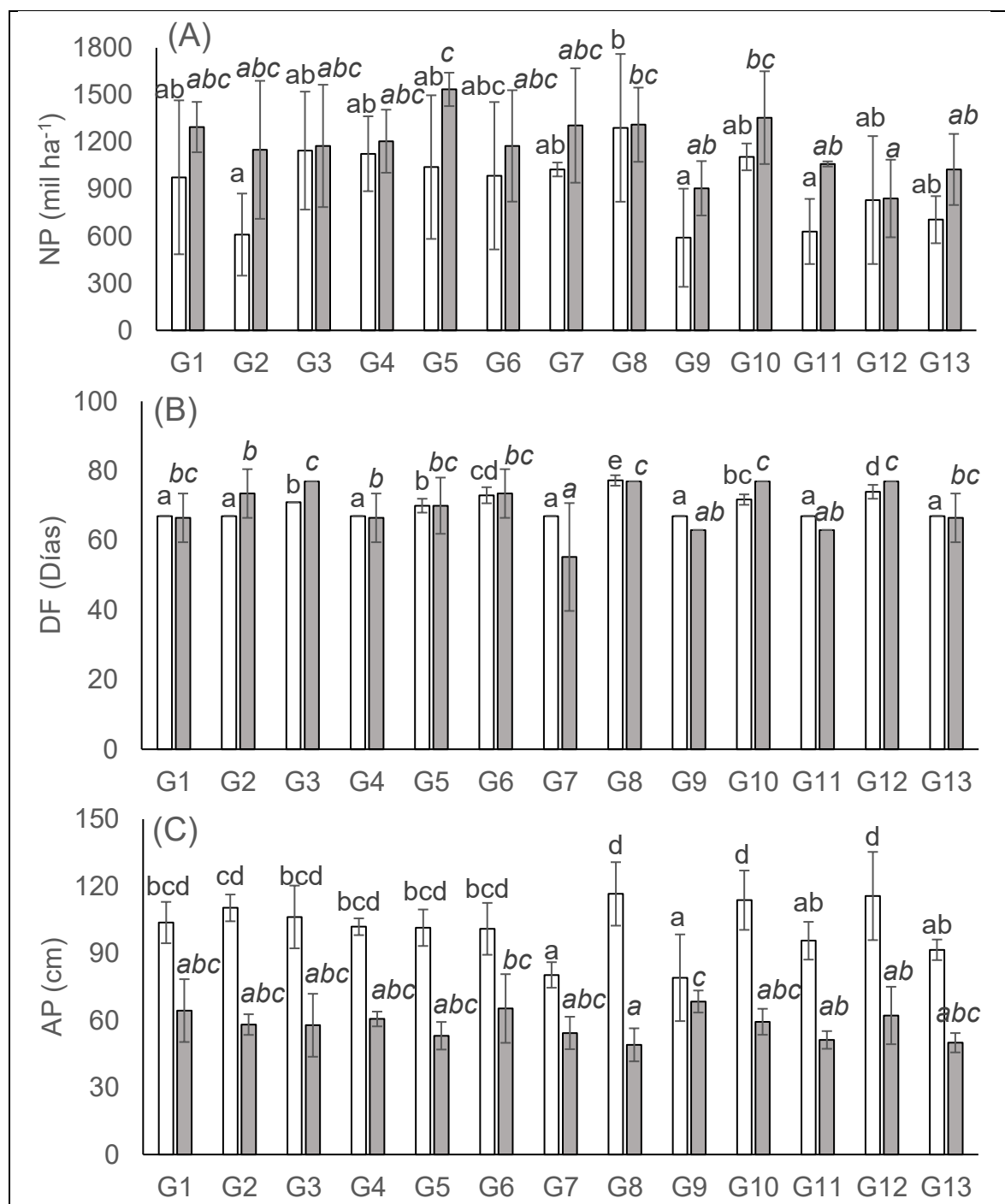
Estos resultados difieren de lo reportado por Al-Naggar *et al.* (2015), quienes encontraron alta variabilidad genética en rasgos radiculares bajo sequía en otros cultivos.

Figura 1. Análisis comparativo del impacto de las condiciones de sitios en la biomasa aérea, rendimiento de granos e índice de cosecha.



(A) BA, Biomasa aérea (ton. ha⁻¹), (B) RG, Rendimiento de granos (ton. ha⁻¹), (C) IC, Índice de Cosecha (%). Las columnas blancas corresponden al sitio de Santa rosa y las columnas grises corresponden al sitio de Cauquenes. Las letras corresponden a la separación de media de cada sitio según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$). Las barras de errores muestran la desviación estándar. G1 a G13 son los genotipos estudiados, mencionados en la Tabla 2.

Figura 2. Análisis comparativo del impacto de las condiciones de sitio en el número de plantas, Días a floración y Altura de planta.



(A) NP, Numero de plantas (mil. ha⁻¹), (B) DF, Días a floración (días), (C) AP, Altura de planta (cm). Las columnas blancas corresponden al sitio de Santa rosa y las columnas grises corresponden al sitio de Cauquenes. Las letras corresponden a la separación de media de cada sitio según la prueba de Duncan ($P \leq 0.05$). Las barras de errores muestran la desviación estándar. G1 a G13 son los genotipos estudiados, mencionados en la Tabla 2.

En este caso, la falta de interacción en raíces podría indicar que la tolerancia diferencial al estrés observada en la parte aérea no está gobernada primariamente por diferencias en la capacidad de exploración radicular, sino probablemente por la eficiencia en el uso del agua o ajustes estomáticos (Razzaghi *et al.*, 2011).

El PSTR mostró diferencias significativas entre Sitio y Genotipo (Apéndice 5 y Figura 4A). En Santa Rosa, el PSTR varió entre 0,54 y 1,42 g, siendo los genotipos AZ-1 y AZ-3 los que presentaron los mayores valores de biomasa radicular. En Cauquenes, el PSTR fue consistentemente menor, oscilando entre 0,23 y 0,74 g, donde destacaron Temuco 22 y Temuco 9 con los valores más altos. La reducción promedio del PSTR en Cauquenes fue de aproximadamente un 40 %, lo que evidencia que el estrés hídrico afecta de manera significativa tanto el desarrollo aéreo como el subterráneo de la planta.

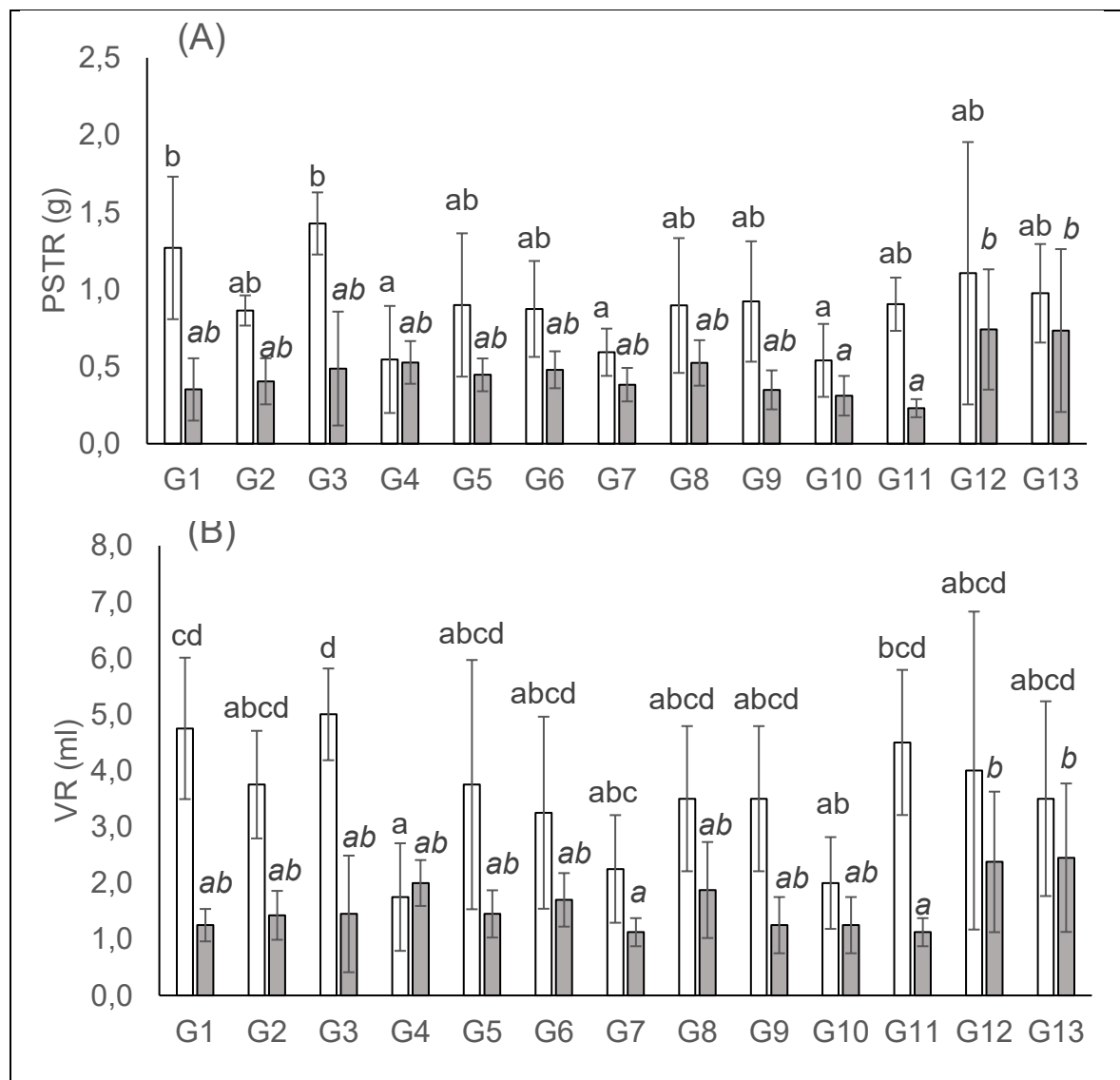
El VR presentó un patrón similar al PSTR (Apéndice 5 y Figura 4B). En Santa Rosa, el VR varió entre 2,0 y 5,0 ml, mientras que en Cauquenes osciló entre 1,1 y 2,5 ml. Los genotipos con mayor biomasa radicular también presentaron los mayores volúmenes, manteniendo una correspondencia directa entre ambas variables. La reducción del volumen radicular en Cauquenes (aproximadamente un 38 %) indica que las condiciones edáficas y la disponibilidad hídrica de Santa Rosa favorecen un mayor desarrollo tridimensional del sistema radicular, lo cual se traduce en una mayor capacidad de exploración del suelo y absorción de recursos (Ruiz y Bertero, 2008).

La PR mostró variaciones entre Sitio y Genotipo (Apéndice 5 y Figura 5A). En Santa Rosa, la PR varió entre 14,7 y 22,7 cm, destacando P. MORADA como el genotipo de mayor profundidad. En Cauquenes, la PR osciló entre 12,4 y 16,9 cm, siendo AZ-2 el genotipo con una profundidad significativamente menor al resto. Aunque las diferencias entre sitios fueron menos pronunciadas que en otras variables (~9 %), se observó una ligera tendencia hacia una mayor profundización en Santa Rosa, posiblemente debido a condiciones edáficas que facilitan la penetración radicular (Rengasamy, 2006).

La LTR presentó diferencias significativas entre sitios (Apéndice 5 y Figura 5B). En Santa Rosa, la LTR varió entre 238,1 y 440,9 cm, con el genotipo AZ-3

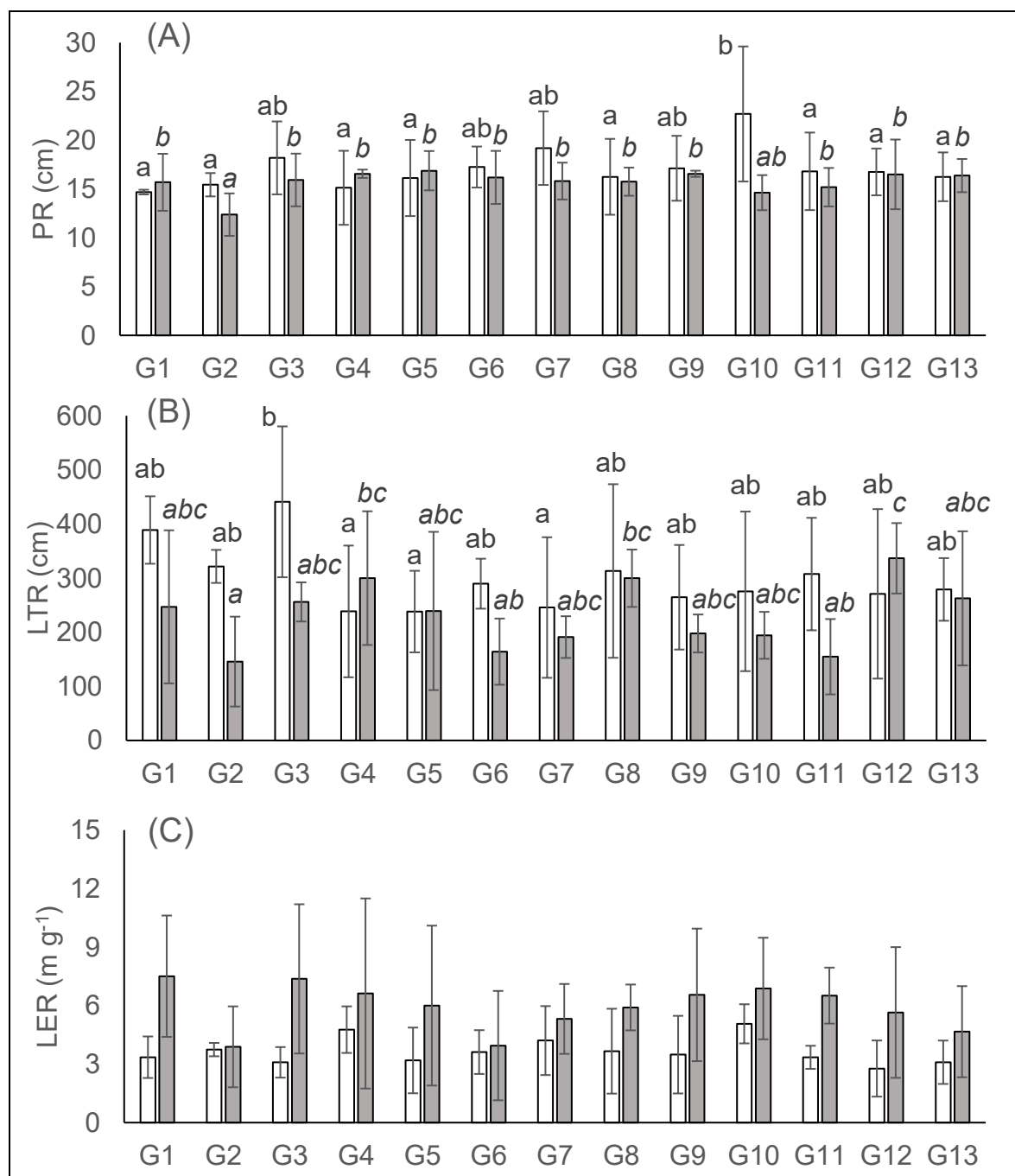
exhibiendo la mayor longitud. En Cauquenes, la LTR fue menor, oscilando entre 145,7 y 336,6 cm, con Temuco 22 exhibiendo la mayor longitud. La reducción promedio de la LTR en Cauquenes fue del 35%, indicando que el estrés hídrico limita la extensión longitudinal del sistema, lo cual afecta la capacidad de búsqueda de agua y nutrientes (Lynch, 2013).

Figura 3. Análisis comparativo del impacto de las condiciones de sitio en el Peso seco de las raíces y Volumen de raíces.



(A) PSTR, Peso seco total de raíces (g), (B) VR, Volumen de raíces (ml). Las columnas blancas corresponden al sitio de Santa rosa y las columnas grises corresponden al sitio de Cauquenes. Las letras corresponden a la separación de media de cada sitio según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$). Las barras de errores muestran la desviación estándar. G1 a G13 son los genotipos estudiados, mencionados en la Tabla 2.

Figura 4. Análisis comparativo del impacto de las condiciones de sitio en la profundidad máxima de raíces, longitud total de raíces y longitud específica de raíces.



(A) PR, Profundidad máxima de raíces (cm), (B) LTR, Longitud total de raíces (cm), (C) LER, Longitud específica de raíces ($m\ g^{-1}$). Las columnas blancas corresponden al sitio de Santa rosa y las columnas grises corresponden al sitio de Cauquenes. Las letras corresponden a la separación de media de cada sitio según la prueba de Duncan ($P \leq 0,05$). Las barras de errores muestran la desviación estándar. G1 a G13 son los genotipos estudiados, mencionados en la Tabla 2.

La LER, que representa la longitud de raíz por unidad de biomasa, mostró variaciones importantes entre sitios (Apéndice 5 y Figura 5C).

En Santa Rosa, la LER varió entre 2,8 y 5,1 m g⁻¹, con P. MORADA exhibiendo la mayor LER. En Cauquenes la LER aumentó más que en Santa Rosa, oscilando entre 3,9 y 7,5 m g, con AZ-1 exhibiendo la mayor LER. Los valores más altos en Cauquenes sugieren que la morfología radicular mostró respuesta ambiental, donde las plantas desarrollan raíces más finas en condiciones de secano para maximizar la superficie de contacto con el suelo y maximizar la absorción de agua (Ryser, 2006).

Correlaciones entre variables radicales y biomasa aérea

En Santa Rosa, las correlaciones fueron generalmente débiles y no significativas (Tabla 3A). Sin embargo, en Cauquenes, se observó una correlación negativa estadísticamente significativa ($P < 0,05$) entre la PR y el RG, con un coeficiente de $r = -0,34$ (Tabla 3B).

Tabla 3. Correlaciones de Pearson entre variables de raíces y componentes agronómicos en (A) Santa Rosa y (B) Cauquenes.

		BA	RG	IC	NP	DF	AP
A)	PSTR	0,13	0,06	0,03	-0,04	0,05	0,14
	VR	0,08	0,01	0,03	-0,10	0,01	0,10
	PR	0,17	0,02	-0,12	-0,05	0,14	0,04
	LTR	0,24	0,15	0,00	0,11	0,01	0,12
	LER	0,04	0,07	-0,02	0,12	-0,09	0,02
		BA	RG	IC	NP	DF	AP
B)	PSTR	-0,05	-0,09	-0,10	-0,25	0,13	0,14
	VR	-0,06	-0,12	-0,20	-0,15	0,18	0,08
	PR	-0,19	-0,34*	-0,23	-0,08	-0,11	-0,02
	LTR	-0,10	-0,18	-0,12	-0,17	0,07	0,11
	LER	0,00	-0,04	0,00	0,10	-0,10	0,02

PSTR, Peso seco total de raíces (g); VR, Volumen de raíces (ml); PR, Profundidad máxima de raíces (cm); LTR, Longitud total de raíces (cm); LER, Longitud específica de raíces (m g⁻¹); BA, Biomasa aérea (ton. ha⁻¹); RG, Rendimiento de granos (ton. ha⁻¹); IC, Índice de cosecha (%); NP, Numero de plantas (mil. ha⁻¹); DF, Días a floración (días); y AP, Altura de planta (cm). n = 52 unidades experimentales por localidad (13 genotipos × 4 repeticiones). *, $P \leq 0,05$.

Este hallazgo es particularmente relevante desde el punto de vista fisiológico y agronómico, ya que sugiere que, bajo condiciones de déficit hídrico severo, la inversión de recursos en el desarrollo de raíces profundas representa un costo energético que compromete la producción de grano. Este fenómeno se explica mediante el principio de *trade-off* (compromiso de recursos): en ambientes con severa limitación hídrica, las plantas que destinan una mayor proporción de fotoasimilados al crecimiento radicular disponen de menos energía para la producción de BA y el llenado de grano (Wasson *et al.*, 2012).

Limitaciones del estudio y perspectivas futuras

Primero, las evaluaciones radiculares se realizaron en una única etapa fenológica (grano lechoso), por lo que no se capturó la dinámica temporal del desarrollo radicular a lo largo del ciclo de cultivo. Estudios futuros que incluyan evaluaciones en múltiples etapas fenológicas (emergencia, ramificación, floración, llenado de grano) podrían proporcionar una comprensión más completa de la arquitectura radicular y su evolución temporal (Uga *et al.*, 2013).

Segundo, el estudio se realizó en una única temporada (2024-2025) y en dos sitios. La inclusión de múltiples temporadas y sitios adicionales permitiría evaluar la estabilidad de las respuestas genotípicas y cuantificar mejor la magnitud de la interacción Genotipo $\times$ Sitio $\times$ Temporada, información crucial para la recomendación de variedades (Poorter *et al.*, 2012).

Finalmente, aunque el estudio documentó correlaciones entre variables radiculares (profundidad de raíces) y agronómicas (rendimiento de granos), no se evaluaron mecanismos fisiológicos subyacentes como eficiencia en el uso del agua, ajuste osmótico, conductancia estomática, o potencial hídrico. La integración de mediciones fisiológicas con las morfológicas proporcionaría una comprensión más mecanística de las estrategias de adaptación a sequía en quinoa (Razzaghi *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

1. Impacto severo del ambiente sobre la productividad: el ambiente fue el factor determinante principal; el estrés hídrico y las condiciones del suelo en

Cauquenes provocaron una reducción promedio del 55% en el rendimiento de grano y del 45% en la biomasa aérea en comparación con Santa Rosa.

2. Estabilidad del rendimiento y ausencia de interacción Sitio x Genotipo: se determinó que los genotipos de alto rendimiento bajo condiciones de riego óptimo (Santa Rosa) tienden a ser también los superiores bajo condiciones de secano (Cauquenes). La ausencia de una interacción significativa entre Sitio y Genotipo para el rendimiento de granos y biomasa sugiere que el orden de mérito de los genotipos se mantiene constante, indicando una adaptabilidad amplia del germoplasma evaluado.
3. Plasticidad fenotípica de la biomasa área como mecanismo de adaptación: a diferencia del rendimiento, variables como la altura de la planta y los días a floración sí mostraron una interacción significativa de Sitio x Genotipo. Esto concluye que los mecanismos de adaptación de la quinoa residen en su plasticidad para modificar su arquitectura aérea y su fenología (como adelantar la floración) para escapar de la sequía o restringir el crecimiento vegetativo, asegurando así la reproducción.
4. Respuesta conservada de la arquitectura radicular: aunque el estrés hídrico redujo significativamente las dimensiones de las raíces (peso, volumen y longitud reducidos entre un 35% y 40%), todos los genotipos respondieron de manera similar (sin interacción Sitio x Genotipo). Esto indica que la tolerancia a la sequía en estos genotipos no depende de diferencias en la capacidad de exploración radicular, sino que la arquitectura radicular responde al ambiente de manera alométrica y conservada en todas las variedades.
5. Relación negativa entre profundidad radicular y rendimiento en sequía: Un hallazgo crucial fue la correlación negativa significativa ($r=-0,34$, $P \leq 0,05$) entre la profundidad de la raíz y el rendimiento de grano en condiciones de secano. Esto sugiere que, bajo estrés hídrico severo, la inversión energética de la planta en desarrollar raíces profundas representa un costo que compromete la producción de granos, ya que se desvían recursos que podrían haberse destinado al llenado del grano.

REFERENCIAS

1. Álvarez-Flores, R., Winkel, T., Nguyen-Thi-Truc, C., & Joffre, R. (2018). Rooting plasticity in wild and cultivated Andean *Chenopodium* under soil water deficit. *Plant and Soil*, 425(1-2), 479–492. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3588-7>
2. Bazile, D., Jacobsen, S. E., & Verniau, A. (2016). The global expansion of quinoa: Trends and limits. *Frontiers in Plant Science*, 7, 622. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>
3. Bertero, H. D., de la Vega, A. J., Correa, G., Jacobsen, S. E., & Mujica, A. (2004a). Genotype and genotype-by-environment interaction effects for grain yield and grain size of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as revealed by pattern analysis of international multi-environment trials. *Field Crops Research*, 89(2–3), 299–318. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.02.006>
4. Bertero, D., Medan, D., & Hall, A. J. (2004b). Changes in apical morphology during floral initiation and reproductive development in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Annals of Botany*, 94(3), 329–335. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0126>
5. FAO. (2013). Quinoa: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/aq287s>
6. García-Parra, M. A., Roa-Acosta, D. F., Stechauner-Rohringer, R., García-Molano, F., & Bazile, D. (2020). Effect of temperature on the growth and development of quinoa plants (*Chenopodium quinoa* Willd.): A review on a global scale. *Sylwan*, 164(5), 411–430. https://www.researchgate.net/publication/341549320_Effect_of_temperature_on_the_growth_and_development_of_quinoa_plants_Chenopodium_quinoa_Willd_A_review_on_a_global_scale
7. Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., Huanca, R., Morales, B., Miranda, R., Cusicanqui, J., & Taboada, C. (2008). Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal of Agronomy*, 28(3), 427–436. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.008>

8. Hinojosa, L., González, J. A., Barrios-Masias, F. H., & Murphy, K. (2018). Quinoa abiotic stress responses: A review. *Plants*, 7(4), 106. <https://doi.org/10.3390/plants7040106>
9. INIA. (2018). Catálogo de variedades locales de quínoa: Zona centro-sur de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/29325>
10. Jacobsen, S. E., Mujica, A., & Jensen, C. R. (2006). The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. *Food Reviews International*, 19(1–2), 99–109. <https://doi.org/10.1081/FRI-120018872>
11. Jacobsen, S. E. (2006). The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1–2), 167–177. <https://doi.org/10.1081/FRI-120018883>
12. Kumar, S., Sharma, P., & Singh, A. K. (2021). Similarities and differences between the responses to osmotic and ionic stress in quinoa under drought and salt stress conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(1), 56–68.
13. Lynch, J. P. (2013). Steep, cheap and deep: An ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Annals of Botany*, 112(2), 347–357. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs293>
14. Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30–50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
15. Razzaghi, F., Ahmadi, S. H., Adolf, V. I., Jensen, C. R., Jacobsen, S. E., & Andersen, M. N. (2011). Water relations and transpiration of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under salinity and soil drying. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(5), 348–360. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00473.x>
16. Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017–1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>
17. Ruiz, K. B., Biondi, S., Oses, R., Acuña-Rodríguez, I. S., Antognoni, F., Martínez-Mosqueira, E. A., ... & Jacobsen, S. E. (2014). Quinoa biodiversity and sustainability for food security under climate change in the Andes. *Frontiers in Plant Science*, 5, 514. DOI:10.1007/s13593-013-0195-0

18. Ruiz, R. A., & Bertero, H. D. (2008). Light interception and radiation use efficiency in temperate quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *European Journal of Agronomy*, 29(4), 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.05.003>
19. Ryser, P. (2006). The mysterious root length. *Plant and Soil*, 286(1), 1–6. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-006-9096-1>
20. Shirali, F., Seifati, S. E., & Sodaiezhadeh, H. (2023). Assessment and comparison of root architecture and Morpho-Anatomy of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars under arid and semi-arid climate. *Desert* (2008-0875), 28(2).
21. Singh, A., Thakur, P., & Singh, S. (2021). Root analysis of quinoa plant. In A. Varma (Ed.), *Biology and Biotechnology of Quinoa: Super Grain for Food Security* (pp. 153–165). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3832-9_8
22. Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., Kanno, N., Inoue, H., Takehisa, H., Motoyama, R., Nagamura, Y., Wu, J., Matsumoto, T., Takai, T., Okuno, K., & Yano, M. (2013). Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics*, 45(9), 1097–1102. <https://doi.org/10.1038/ng.2725>
23. Wasson, A. P., Richards, R. A., Chatrath, R., Misra, S. C., Prasad, S. V. S., Rebetzke, G. J., Kirkegaard, J. A., Christopher, J., & Watt, M. (2012). Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *Journal of Experimental Botany*, 63(9), 3485–3498. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers111>
24. Zurita-Silva, A., Fuentes, F., Zamora, P., Jacobsen, S. E., & Schwember, A. R. (2014). Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Potential and perspectives. *Molecular Breeding*, 34(1), 13–30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023-5>

APPENDICES

Apéndice 1. Resultados del análisis químico del suelo en INIA- Santa Rosa.

Suelo	Unidades	Valor	Nivel
pH en agua	--	6,02	Medio
Materia Orgánica	%	4,24	Medio
Suelo	Unidades	Valor	Nivel
Nitratos (N-NO_3^-)	mg/Kg	19,61	Medio
Amonio (N-NH_4^+)	mg/Kg	3,10	Bajo
Nitrógeno Disponible	mg/Kg	23,50	Medio
Fósforo Olsen	mg/Kg	52,40	Alto
K disponible	mg/Kg	176,70	Alto
K intercambiable	cmol/Kg	0,45	Alto

* El análisis fue realizado en el Laboratorio de Suelos de INIA Quilamapu.

Apéndice 2. Resultados del análisis químico del suelo en INIA- Cauquenes.

Suelo	Unidades	Valor	Nivel
pH en agua	--	6,10	Medio
Materia Orgánica	%	2,18	Bajo
Suelo	Unidades	Valor	Nivel
Nitratos (N-NO_3^-)	mg/Kg	5,00	Bajo
Amonio (N-NH_4^+)	mg/Kg	5,40	Bajo
Nitrógeno Disponible	mg/Kg	10,4	Bajo
Fósforo Olsen	mg/Kg	3,10	Bajo
K disponible	mg/Kg	171,70	Medio
K intercambiable	cmol/Kg	0,44	Medio

* El análisis fue realizado en el Laboratorio de Suelos de INIA Quilamapu.

Apéndice 3. Cámara de color negro con luces LED, para fotografiar las raíces.



Apéndice 4. Resumen del análisis de varianza para variables agronómicas y componentes del rendimiento de genotipos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) evaluados bajo condiciones contrastantes de disponibilidad hídrica (Santa Rosa y Cauquenes).

Fuentes de varianza	BA	RG	IC	NP	DF	AP
Sitio	0.000***	0.000***	0.019*	0.000***	0.984	0.000***
Replica	0.000***	0.077	0.010**	0.573	0.876	0.005**
Genotipo	0.028*	0.003**	0.005**	0.002**	0.000***	0.000***
Sitio x Genotipo	0.076	0.188	0.319	0.779	0.026*	0.000***

BA, Biomasa aérea (t ha^{-1}); RG, Rendimiento de granos (t ha^{-1}); IC, Índice de cosecha (%); NP, Número de plantas (miles ha^{-1}); DF, Días a floración; AP, Altura de planta (cm). Los valores presentados corresponden a valores P. *, $P \leq 0.05$; **, $P \leq 0.01$; y ***, $P \leq 0.001$.

Apéndice 5. Resumen del análisis de varianza para variables morfológicas del sistema radicular de genotipos de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) evaluados bajo condiciones contrastantes de disponibilidad hídrica (Santa Rosa y Cauquenes).

Fuentes de varianza	PSTR	VR	PR	LTR	LER
Sitio	0.000***	0.000***	0.021*	0.001***	0.000***
Replica	0.750	0.486	0.162	0.208	0.742
Genotipo	0.035*	0.100	0.289	0.156	0.728
Sitio x Genotipo	0.202	0.056	0.148	0.152	0.835

PSTR, Peso seco total de raíces (g); VR, Volumen de raíces (ml); PR, Profundidad máxima de raíces (cm); LTR, Longitud total de raíces (cm), LER: Longitud específica de raíces (m g^{-1}). Los valores presentados corresponden a valores P. *, $P \leq 0.05$; **, $P \leq 0.01$; y ***, $P \leq 0.001$.