

## Artículo Revisión

### Evaluación agronómica de variedades mejoradas de quinua adaptadas a condiciones de sequía

#### Agronomic evaluation of improved quinoa varieties adapted to drought conditions

Dayana Mishelle Sigüenza Sánchez<sup>1\*</sup>  

<sup>1</sup>Universidad Agraria del Ecuador, Milagro-Ecuador

\*Autor de correspondencia: Dayana Mishelle Sigüenza Sánchez 

Recibido: 08-08-2025

Revisado: 15-08-2025

Aceptado: 22-08-2025

Publicado: 29-08-2025

**Cómo citar este artículo:** Sigüenza Sánchez, D. M. (2025). Evaluación agronómica de variedades mejoradas de quinua adaptadas a condiciones de sequía. Vitterra, 3(2), 1-34. <https://vitterra.diginova.pro/index.php/vitterra/article/view/29>

## RESUMEN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) constituye un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y la agricultura de las regiones áridas y semiáridas debido a su diversidad genética, valor nutricional y capacidad de adaptación a condiciones ambientales adversas. Sin embargo, el incremento de la frecuencia e intensidad de las sequías asociado con el cambio climático plantea la necesidad de identificar y mejorar variedades capaces de mantener características agronómicas y productivas favorables bajo condiciones de déficit hídrico. El objetivo del presente artículo fue analizar, mediante una revisión de alcance, la evidencia disponible sobre la evaluación agronómica de variedades mejoradas de quinua adaptadas a condiciones de sequía, considerando sus respuestas morfológicas, fisiológicas y productivas. La revisión comprendió estudios académicos y publicaciones especializadas relacionadas con crecimiento, desarrollo, rendimiento, índice de cosecha, biomasa radicular, eficiencia en el uso del agua y mecanismos de adaptación al estrés hídrico. Los hallazgos evidencian una considerable variabilidad en las respuestas de los cultivares frente a la disponibilidad limitada de agua. La altura de planta, diámetro y longitud de panoja, producción de biomasa, rendimiento de grano, índice de cosecha, desarrollo radicular y eficiencia hídrica constituyen los principales indicadores utilizados para identificar materiales tolerantes. Las variedades mejor adaptadas presentan mecanismos relacionados con sistemas radiculares eficientes, regulación del crecimiento, mantenimiento de la actividad fisiológica y capacidad para estabilizar el rendimiento. No obstante, persisten diferencias metodológicas y vacíos relacionados con evaluaciones multiterritoriales y de largo plazo. Se concluye que la evaluación agronómica integrada con indicadores fisiológicos constituye una estrategia fundamental para seleccionar variedades mejoradas de quinua resilientes a la sequía y fortalecer la sostenibilidad productiva en ambientes vulnerables al cambio climático.

**Palabras clave:** quinua; sequía; estrés hídrico; evaluación agronómica; variedades mejoradas; adaptación climática.

## ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a strategic crop for food security and agriculture in arid and semi-arid regions due to its genetic diversity, nutritional value, and ability to adapt to adverse environmental conditions. However, the increasing frequency and intensity of droughts associated with climate change highlight the need to identify and improve varieties capable of maintaining favourable agronomic and productive traits under water deficit conditions. The objective of this article was to analyse, through a scoping review, the available evidence on the agronomic evaluation of improved quinoa varieties adapted to drought conditions, considering their morphological, physiological, and productive responses. The review included academic studies and specialised publications related to growth, development, yield, harvest index, root biomass, water-use efficiency, and mechanisms of adaptation to water stress. The findings reveal considerable variability in cultivar responses to limited water availability. Plant height, panicle diameter and length, biomass production, grain yield, harvest index, root development, and water-use efficiency are the main indicators used to identify tolerant materials. Better-adapted varieties exhibit mechanisms related to efficient root systems, growth regulation, maintenance of physiological activity, and the ability to stabilise yield. Nevertheless,

methodological differences and gaps remain regarding multi-location and long-term evaluations. It is concluded that agronomic evaluation integrated with physiological indicators constitutes a fundamental strategy for selecting improved drought-resilient quinoa varieties and strengthening production sustainability in environments vulnerable to climate change.

**Keywords:** quinoa; drought; water stress; agronomic evaluation; improved varieties; climate adaptation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La agricultura mundial enfrenta desafíos asociados con el cambio climático, la degradación de los recursos naturales, el crecimiento demográfico y la necesidad de garantizar una producción estable de alimentos. Entre estos problemas, la disminución de la disponibilidad hídrica constituye una de las amenazas más importantes para los sistemas agrícolas establecidos en regiones áridas, semiáridas y altoandinas. Los periodos de sequía pueden alterar la germinación, el crecimiento vegetativo, el desarrollo reproductivo y la formación de granos, ocasionando reducciones significativas en la productividad. En este escenario, la identificación de cultivos y variedades capaces de mantener un comportamiento agronómico aceptable bajo condiciones restrictivas representa una prioridad para la investigación y el mejoramiento genético.

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) ha adquirido relevancia internacional debido a su valor nutricional, diversidad genética y capacidad para desarrollarse en ambientes contrastantes. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura reconoce su potencial para contribuir a la seguridad alimentaria, especialmente en territorios afectados por limitaciones productivas y ambientales (Bazile et al., 2016). Aunque su cultivo se encuentra históricamente vinculado con la región andina, la expansión mundial de la quinua ha favorecido su introducción en nuevos sistemas agrícolas. Bazile et al. (2016) señalan que esta expansión ofrece oportunidades productivas, pero también exige evaluar cuidadosamente la adaptación de los materiales genéticos a condiciones diferentes de aquellas en las que fueron seleccionados.

La diversidad genética de la quinua constituye uno de los principales recursos para afrontar condiciones ambientales adversas. Los materiales disponibles presentan diferencias morfológicas, fenológicas, fisiológicas y productivas relacionadas con su procedencia y sus procesos históricos de selección. Hinojosa et al. (2018) destacan que esta biodiversidad proporciona una base estratégica para la seguridad alimentaria y el desarrollo de cultivos adaptados al cambio climático. En consecuencia, la caracterización de variedades mejoradas y materiales locales permite reconocer rasgos útiles para los programas de selección, como la precocidad, la arquitectura de la planta, el desarrollo radicular, la estabilidad del rendimiento y la eficiencia en el uso del agua.

El conocimiento genómico alcanzado durante los últimos años también ha ampliado las posibilidades de identificar genes y mecanismos vinculados con la adaptación de la quinua. La secuenciación de su genoma proporcionó una base para estudiar características relacionadas con la tolerancia a factores abióticos, la calidad del grano y la domesticación de la especie (Jarvis et al., 2017). Estos avances pueden complementar la selección agronómica convencional y facilitar el desarrollo de variedades que combinen productividad, calidad y adaptación ambiental. Sin embargo, el potencial genético de un material necesita comprobarse mediante evaluaciones realizadas bajo condiciones de estrés controlado y en ambientes productivos reales.

La sequía afecta a la quinua mediante cambios en su crecimiento, intercambio gaseoso, relaciones hídricas y distribución de biomasa. Hinojosa et al. (2018) comprobaron que el secado progresivo del suelo modifica la conductancia estomática, la transpiración y el estado hídrico de las plantas cultivadas en campo. Estas respuestas permiten disminuir temporalmente la pérdida de agua, aunque también pueden reducir la asimilación de carbono y limitar el crecimiento cuando el estrés se prolonga. La intensidad de los daños depende del genotipo, la etapa fenológica en la que ocurre el déficit y la duración de la restricción hídrica.

La regulación estomática constituye uno de los mecanismos fisiológicos empleados por la quinua para responder a la reducción de humedad en el suelo. Hinojosa et al. (2018) analizaron la posible participación del ácido abscísico generado en las raíces en el control de los estomas durante la sequía. Esta respuesta permite ajustar la transpiración

y conservar agua, pero su efectividad puede variar entre materiales genéticos y niveles de estrés. Por ello, el análisis fisiológico resulta necesario para explicar por qué determinadas variedades mantienen mejores condiciones hídricas y productivas que otras cuando son expuestas a un déficit similar.

Las diferencias genotípicas también se manifiestan en el intercambio gaseoso y la eficiencia en el uso del agua. Hinojosa et al. (2018) identificaron variaciones entre cultivares en parámetros relacionados con la asimilación de carbono y la respuesta fisiológica frente a la sequía. Estas diferencias confirman que la tolerancia no constituye una característica uniforme dentro de la especie, sino el resultado de distintas estrategias de regulación y adaptación. En consecuencia, la comparación entre variedades debe integrar indicadores capaces de mostrar tanto los efectos inmediatos del estrés como su influencia acumulada sobre la producción.

La intensidad y progresión del déficit hídrico condicionan igualmente el comportamiento de las variedades. Al-Naggar et al. (2017) observaron respuestas diferenciadas entre dos materiales de quinua expuestos a sequía progresiva, lo que evidencia la influencia del genotipo sobre la capacidad de ajuste fisiológico. Algunas variedades pueden reducir rápidamente la transpiración para conservar agua, mientras que otras mantienen durante más tiempo el intercambio gaseoso y el crecimiento. Ninguna de estas respuestas debe interpretarse de manera aislada, pues su utilidad agronómica depende de la capacidad final de la planta para completar su ciclo y producir grano.

La acumulación de compuestos antioxidantes representa otra respuesta vinculada con la protección frente al estrés hídrico. Hinojosa et al. (2018) determinaron que la sequía puede modificar la capacidad antioxidante de la quinua, aunque la magnitud de esta respuesta varía según el material evaluado. La activación de estos mecanismos contribuye a limitar el daño oxidativo ocasionado por la reducción de agua y complementa otras respuestas, como el cierre estomático y el ajuste osmótico. La tolerancia a la sequía debe entenderse, por tanto, como una característica compleja en la que intervienen simultáneamente procesos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y fenológicos.

La flexibilidad fenológica constituye una ventaja importante para la adaptación de la quinua a ambientes con disponibilidad hídrica variable. Hinojosa et al. (2018) demostraron que el cultivo puede modificar la duración de determinadas etapas de desarrollo en respuesta al estrés, lo que influye en el consumo de agua y en la formación del rendimiento. Esta capacidad permite que ciertos materiales ajusten su ciclo para evitar que las fases más sensibles coincidan con periodos críticos de sequía. No obstante, una reducción excesiva del ciclo también puede limitar la acumulación de biomasa y el llenado del grano, de modo que la precocidad debe analizarse junto con otros componentes productivos.

El momento de aparición del déficit hídrico resulta tan importante como su intensidad. La quinua puede presentar mayor sensibilidad durante la floración, formación de la panoja y llenado del grano, etapas en las que la restricción de agua puede afectar directamente el número y peso de las semillas. Los modelos desarrollados por Al-Naggar et al. (2017) muestran que la disponibilidad hídrica condiciona las brechas de rendimiento y que una gestión adecuada del agua puede mejorar la productividad en el altiplano boliviano. Estos resultados respaldan la necesidad de relacionar las evaluaciones varietales con las condiciones ambientales y el manejo aplicado durante cada fase del cultivo.

La evaluación agronómica constituye una herramienta fundamental para identificar los materiales que mantienen un comportamiento favorable bajo condiciones restrictivas. Al-Naggar et al. (2017) examinó características agronómicas de diez cultivares tolerantes a sequía y destacó la importancia de comparar indicadores relacionados con crecimiento, desarrollo y productividad. Entre las variables utilizadas habitualmente se encuentran la altura de la planta, longitud y diámetro de la panoja, biomasa, rendimiento de grano e índice de cosecha. El análisis conjunto de estos parámetros permite diferenciar materiales con alto rendimiento en condiciones favorables de aquellos que conservan mayor estabilidad cuando disminuye la disponibilidad de agua.

El rendimiento de grano representa uno de los principales criterios de selección, pero no debe considerarse de forma independiente. Una variedad puede alcanzar una elevada producción en condiciones óptimas y experimentar una reducción pronunciada durante la sequía, mientras que otro material puede presentar un rendimiento moderado y conservar una mayor estabilidad bajo estrés. Al-Naggar et al. (2017) encontraron diferencias entre genotipos sometidos a niveles moderados y severos de sequía, demostrando que la tolerancia se relaciona con diversos

caracteres agronómicos. Por esta razón, los programas de mejoramiento deben analizar tanto el rendimiento potencial como la magnitud de su disminución y la recuperación de las plantas después del estrés.

El índice de cosecha aporta información sobre la proporción de biomasa que la planta destina a la producción de grano. Bajo déficit hídrico, una variedad puede mantener su crecimiento vegetativo, pero presentar dificultades para trasladar los fotoasimilados hacia las estructuras reproductivas. Por consiguiente, la evaluación conjunta de biomasa, rendimiento e índice de cosecha permite comprender mejor la eficiencia productiva de cada material. Estas variables adquieren especial importancia cuando el objetivo no consiste únicamente en conservar la supervivencia de la planta, sino en mantener una producción económicamente aceptable.

La arquitectura y el desarrollo del sistema radicular también intervienen en la capacidad de adaptación. Las raíces capaces de explorar un mayor volumen de suelo pueden acceder a reservas de agua situadas a diferentes profundidades, mientras que el incremento relativo de biomasa radicular puede favorecer la absorción durante periodos de escasez. Hinojosa et al. (2018) explican que las respuestas de la quinua frente a los factores abióticos comprenden ajustes morfológicos y fisiológicos que actúan de manera coordinada. Sin embargo, una mayor asignación de recursos hacia las raíces puede reducir temporalmente el crecimiento de la parte aérea, por lo que su beneficio debe evaluarse considerando el rendimiento final.

La integración de indicadores agronómicos y fisiológicos ofrece una comprensión más completa de la tolerancia. Gámez Guzmán (2018) evaluó el rendimiento y la caracterización fisiológica de dos variedades sometidas a déficit hídrico en invernadero, mostrando la utilidad de relacionar los cambios fisiológicos con las respuestas productivas. Las condiciones controladas permiten aislar determinadas variables y reconocer mecanismos específicos, pero no reproducen completamente la complejidad ambiental de los sistemas agrícolas. Por esta razón, los resultados obtenidos en invernadero requieren validación posterior mediante ensayos de campo.

Las evaluaciones realizadas en campo permiten examinar la interacción entre genotipo y ambiente, así como la influencia de la temperatura, el suelo, las precipitaciones y el manejo agronómico. Una variedad con resultados favorables en una localidad puede presentar un comportamiento diferente cuando cambia la altitud, la distribución de las lluvias o la fertilidad del suelo. Los programas de mejoramiento de la quinua deben considerar estas interacciones para seleccionar materiales con adaptación específica o estabilidad amplia. Murphy et al. (2018) señalan que el mejoramiento y la genómica ofrecen herramientas complementarias para desarrollar variedades ajustadas a las demandas productivas y ambientales de distintas regiones.

La heterogeneidad metodológica de las investigaciones continúa representando una dificultad para comparar los resultados disponibles. Los estudios emplean diferentes genotipos, niveles de estrés, etapas de aplicación del déficit hídrico, diseños experimentales e indicadores de respuesta. También existen diferencias entre los resultados obtenidos bajo condiciones controladas y aquellos procedentes de ambientes productivos. Esta diversidad evidencia la necesidad de organizar la información disponible y determinar cuáles son las variables más utilizadas y consistentes para evaluar la adaptación agronómica de la quinua a la sequía.

El desarrollo de variedades mejoradas requiere integrar tolerancia al estrés, estabilidad productiva, calidad del grano y aceptación por parte de los productores y consumidores. Murphy et al. (2018) sostienen que el mejoramiento de la quinua presenta un potencial considerable, pero demanda estrategias capaces de aprovechar su diversidad genética y responder a las nuevas condiciones de producción. La selección no debe concentrarse exclusivamente en el rendimiento máximo alcanzado bajo condiciones favorables, sino también en la capacidad de conservar características productivas y fisiológicas cuando disminuye la disponibilidad de agua.

En este contexto, la revisión de alcance resulta pertinente para mapear la evidencia disponible, reconocer los métodos empleados y establecer los principales vacíos de conocimiento. Peters et al. (2020) señalan que este tipo de revisión permite examinar campos amplios y heterogéneos, aclarar conceptos y describir las características de la producción científica existente. Su aplicación resulta especialmente adecuada para analizar investigaciones que utilizan diferentes variedades, ambientes, tratamientos e indicadores, sin restringir la síntesis a una única medida de resultado. Además, las orientaciones PRISMA-ScR contribuyen a comunicar de manera transparente el proceso de identificación, selección

y organización de las fuentes examinadas (Tricco et al., 2018). La sistematización de esta evidencia puede aportar criterios para diseñar nuevos ensayos, comparar materiales y fortalecer los programas de mejoramiento dirigidos a regiones afectadas por sequía.

La diversidad de respuestas agronómicas y fisiológicas documentadas en la quinua evidencia la necesidad de integrar los hallazgos disponibles para identificar los indicadores más consistentes de tolerancia al déficit hídrico. Hinojosa et al. (2018) explican que la adaptación de esta especie frente a factores abióticos comprende mecanismos morfológicos, fisiológicos y bioquímicos que deben analizarse conjuntamente. Desde la perspectiva del mejoramiento, Murphy et al. (2018) destacan la importancia de relacionar estos mecanismos con el rendimiento, la estabilidad productiva y la adaptación ambiental de los materiales. Por consiguiente, la pregunta que orienta el presente estudio es la siguiente: ¿Cuáles son las principales características agronómicas, fisiológicas y productivas utilizadas para evaluar variedades mejoradas de quinua adaptadas a condiciones de sequía, y qué tendencias, resultados y vacíos de conocimiento presenta la literatura disponible? En correspondencia con esta pregunta, el objetivo del artículo es analizar, mediante una revisión de alcance, la evidencia disponible sobre la evaluación agronómica de variedades mejoradas de quinua adaptadas a condiciones de sequía, identificando los principales indicadores morfológicos, fisiológicos y productivos, las respuestas de los cultivares frente al estrés hídrico, las estrategias de adaptación y las perspectivas para el mejoramiento de la especie ante el cambio climático.

## 2. METODOLOGÍA

### Diseño de la revisión de alcance

El estudio se desarrolló mediante una revisión de alcance orientada a identificar, organizar y analizar la evidencia disponible sobre la evaluación agronómica de variedades mejoradas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) adaptadas a condiciones de sequía. Este diseño fue seleccionado debido a la diversidad de cultivares, condiciones experimentales, tratamientos hídricos, variables agronómicas e indicadores fisiológicos presentes en la literatura. Peters et al. (2020) explican que las revisiones de alcance son apropiadas para examinar campos amplios y heterogéneos, delimitar conceptos, reconocer los tipos de evidencia existentes e identificar vacíos que requieren futuras investigaciones.

La revisión permitió examinar de manera integral las principales líneas de investigación relacionadas con el comportamiento de la quinua frente a la disponibilidad limitada de agua. Además de los indicadores agronómicos asociados con crecimiento y productividad, se consideraron las respuestas fisiológicas que permiten comprender los mecanismos de adaptación de los cultivares. Hinojosa et al. (2018) señalan que la tolerancia de la quinua a factores abióticos depende de la interacción entre características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas y fenológicas. Por esta razón, la revisión no se restringió al rendimiento de grano, sino que incorporó variables relacionadas con biomasa, desarrollo radicular, intercambio gaseoso, eficiencia en el uso del agua e índice de cosecha.

El proceso metodológico comprendió la formulación de la pregunta de investigación, delimitación del objeto de estudio, identificación de las fuentes de información, establecimiento de los criterios de elegibilidad, selección de los documentos, extracción de los datos y síntesis temática de los resultados. La presentación de estas etapas se orientó mediante las recomendaciones PRISMA-ScR, desarrolladas para mejorar la transparencia en la comunicación de las revisiones de alcance (Tricco et al., 2018). Estas orientaciones permitieron estructurar el proceso de búsqueda y selección sin transformar la revisión en un metaanálisis, debido a la heterogeneidad de los estudios recuperados.

La pregunta que orientó la revisión fue la siguiente: ¿Cuáles son las principales características agronómicas, fisiológicas y productivas utilizadas para evaluar variedades mejoradas de quinua adaptadas a condiciones de sequía, y qué tendencias, resultados y vacíos de conocimiento presenta la literatura disponible? A partir de esta interrogante, el análisis se concentró en estudios sobre variedades, cultivares, ecotipos y materiales genéticos de quinua evaluados bajo sequía, déficit hídrico, secano o disponibilidad restringida de agua.

La búsqueda se delimitó a publicaciones comprendidas entre enero de 2015 y diciembre de 2024. Este periodo permitió reunir evidencia reciente sobre evaluación agronómica, respuestas fisiológicas, genómica, mejoramiento y

adaptación de la quinua al déficit hídrico. La delimitación temporal favoreció la coherencia de la revisión y aseguró que el análisis se sustentara en avances contemporáneos del campo.

### **Fuentes de información y estrategia de búsqueda**

La búsqueda documental se orientó hacia la localización de artículos científicos, tesis universitarias, publicaciones académicas y documentos institucionales relacionados con la evaluación agronómica y fisiológica de la quinua bajo condiciones de sequía. Se consultaron repositorios de la Universidad Nacional del Altiplano y de la Universidad Pública de Navarra, instituciones en las que se identificaron investigaciones específicas sobre cultivares sometidos a déficit hídrico. También se revisaron repositorios de la Universidad Mayor de San Andrés, Universidad Politécnica de Madrid y Universidad Andina Simón Bolívar, además de SciELO Bolivia, repositorios académicos latinoamericanos y revistas científicas vinculadas con agronomía, fisiología vegetal, mejoramiento genético y gestión del agua.

La inclusión de artículos científicos, revisiones, tesis académicas y documentos institucionales permitió recuperar evidencia procedente de contextos andinos y de otros ambientes donde la quinua posee importancia productiva. Al-Naggar et al. (2017) compararon genotipos sometidos a niveles moderados y severos de sequía, mientras que Gámez Guzmán (2018) examinó el rendimiento y las respuestas fisiológicas de variedades bajo déficit hídrico en condiciones de invernadero. La consideración de estudios de campo y experimentales permitió contrastar el desempeño productivo con los mecanismos fisiológicos asociados con la tolerancia.

La estrategia de búsqueda se construyó mediante términos relacionados con la especie, las condiciones hídricas y los indicadores de respuesta. En español se utilizaron las expresiones “quinua y sequía”, “evaluación agronómica de quinua”, “variedades de quinua tolerantes a sequía”, “estrés hídrico en quinua”, “déficit hídrico y rendimiento de quinua”, “adaptación de quinua a sequía”, “quinua bajo condiciones de secano”, “características agronómicas de quinua”, “respuestas fisiológicas de quinua a sequía”, “biomasa radicular de quinua”, “eficiencia en el uso del agua en quinua” y “mejoramiento de quinua para ambientes secos”. Estos descriptores respondieron a las variables más frecuentes en los estudios sobre adaptación y productividad del cultivo.

Para ampliar la cobertura de la búsqueda, también se emplearon los términos en inglés “quinoa drought tolerance”, “agronomic evaluation of quinoa”, “quinoa water stress”, “quinoa water deficit”, “drought-adapted quinoa varieties”, “quinoa yield under drought”, “quinoa physiological responses to drought” y “quinoa water-use efficiency”. Los términos fueron combinados mediante los operadores booleanos AND y OR, de acuerdo con las posibilidades de cada fuente consultada. Las combinaciones buscaron relacionar el nombre común y científico de la especie con sequía, déficit hídrico, rendimiento, características agronómicas y respuestas fisiológicas.

La estrategia estuvo dirigida principalmente a identificar investigaciones que permitieran comparar variedades y cultivares, determinar los indicadores empleados para medir la tolerancia y reconocer las respuestas asociadas con la adaptación al estrés hídrico. La selección de estos conceptos estuvo respaldada por estudios que relacionan la disponibilidad de agua con la fenología, el consumo hídrico y el rendimiento de la quinua. Hinojosa et al. (2018) analizaron la flexibilidad fenológica frente a la sequía, mientras que las evaluaciones genotípicas desarrolladas por Hinojosa et al. (2018) incorporaron parámetros de intercambio gaseoso e isótopos estables para examinar diferencias entre cultivares.

### **Criterios de inclusión y exclusión**

Los criterios de elegibilidad se establecieron en correspondencia con la pregunta y el objetivo de la revisión. Se incluyeron estudios centrados en variedades, cultivares, ecotipos o materiales genéticos de quinua evaluados bajo condiciones de sequía, déficit hídrico, secano o disponibilidad limitada de agua. También se consideraron investigaciones que analizaran indicadores agronómicos, fisiológicos o productivos vinculados con tolerancia, adaptación o estabilidad. Esta delimitación permitió mantener la atención sobre el comportamiento diferencial de los materiales y evitar la incorporación de publicaciones que abordaran la especie sin examinar su respuesta al estrés hídrico.

Se admitieron estudios desarrollados en campo, invernadero y ambientes experimentales controlados, debido a que cada condición aporta evidencia complementaria. Los experimentos controlados permiten examinar mecanismos específicos y aplicar niveles definidos de déficit hídrico, como se observa en la investigación de Al-Naggar et al. (2017) sobre la sensibilidad de dos variedades frente a una sequía progresiva. En cambio, los ensayos de campo permiten analizar la interacción entre genotipo, suelo, clima y manejo agronómico, proporcionando información con mayor proximidad a las condiciones productivas.

También fueron elegibles las investigaciones que proporcionaran información sobre altura de planta, características de la panoja, producción y distribución de biomasa, desarrollo radicular, comportamiento hídrico, intercambio gaseoso, eficiencia en el uso del agua, rendimiento de grano, índice de cosecha y estabilidad productiva. Al-Naggar et al. (2017) utilizaron diferentes características para analizar la tolerancia de genotipos sometidos a niveles moderados y severos de sequía, lo que demuestra la necesidad de considerar múltiples indicadores. Asimismo, se incluyeron estudios sobre mejoramiento, diversidad genética y adaptación climática cuando sus resultados permitieran interpretar el comportamiento de la quinua bajo disponibilidad hídrica restringida.

En cuanto al tipo de documento, se incluyeron artículos científicos revisados por pares, tesis universitarias, trabajos académicos y documentos institucionales que presentaran información suficiente sobre los materiales evaluados, las condiciones experimentales, los indicadores analizados y los resultados obtenidos. La incorporación de tesis respondió a la importancia de recuperar evidencia producida en territorios andinos que no siempre se encuentra publicada en revistas indexadas, pero que contiene evaluaciones agronómicas pertinentes para los objetivos de la revisión.

Se excluyeron las publicaciones dedicadas exclusivamente a las características nutricionales, composición química, procesamiento industrial, comercialización o consumo de la quinua cuando no proporcionaban información sobre su comportamiento frente a la sequía. También se descartaron estudios concentrados únicamente en salinidad cuando no establecían relaciones aplicables al déficit hídrico, debido a que ambos factores generan respuestas parcialmente compartidas, pero no son equivalentes. Los documentos duplicados, las publicaciones sin acceso a información suficiente y los trabajos que no permitían identificar las variables o condiciones de evaluación también fueron retirados.

### **Proceso de selección de la evidencia**

El proceso de selección se desarrolló mediante las etapas de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, siguiendo la lógica de presentación propuesta por PRISMA-ScR (Tricco et al., 2018). En la fase de identificación se reunieron los registros recuperados mediante las búsquedas efectuadas en repositorios, fuentes académicas y revistas científicas. Posteriormente, los registros fueron organizados para reconocer y eliminar duplicados antes de iniciar la revisión de su contenido.

Durante el cribado se examinaron los títulos y resúmenes disponibles para determinar su relación con la evaluación de quinua bajo sequía o déficit hídrico. En esta fase se excluyeron las publicaciones centradas en aspectos nutricionales, industriales, comerciales o botánicos que no aportaban información agronómica o fisiológica pertinente. Peters et al. (2020) indican que la selección de evidencia en una revisión de alcance debe mantener correspondencia con la pregunta formulada y con los conceptos centrales definidos previamente.

Los documentos potencialmente pertinentes fueron examinados posteriormente en texto completo. Durante esta etapa se verificaron los objetivos, materiales genéticos estudiados, condiciones de cultivo, tratamientos de déficit hídrico, variables evaluadas y resultados comunicados. Los trabajos que no permitían identificar estos elementos o que no respondían al objetivo de la revisión fueron excluidos. La aplicación de estos criterios permitió diferenciar los estudios específicamente orientados a la sequía de aquellos que mencionaban el estrés hídrico únicamente como parte del contexto general.

Finalmente, las publicaciones que cumplieron los criterios de elegibilidad fueron incorporadas a la síntesis descriptiva y temática. Debido a la naturaleza exploratoria de la revisión, el proceso se concentró en mapear las características de la evidencia y no en establecer una estimación cuantitativa conjunta del efecto de la sequía. El número de registros

identificados, duplicados eliminados, documentos cribados, textos completos evaluados y estudios incluidos deberá presentarse en el diagrama de flujo PRISMA-ScR para garantizar la trazabilidad del proceso.

### **Extracción y organización de la información**

La información de los documentos seleccionados se registró en una matriz de extracción diseñada de acuerdo con la pregunta de investigación y las recomendaciones para la organización de evidencia en revisiones de alcance. Peters et al. (2020) señalan que la extracción debe permitir describir las principales características de las fuentes y relacionarlas con los objetivos planteados. Para cada estudio se consignaron el autor o institución, año de publicación, ubicación geográfica, variedades o cultivares evaluados, condiciones experimentales, características ambientales, tratamiento de déficit hídrico, indicadores agronómicos, variables fisiológicas, componentes productivos y resultados principales. La extracción incorporó información sobre el momento, intensidad y duración del estrés siempre que estos datos estuvieran disponibles. Esta diferenciación resultó necesaria porque la respuesta de la quinua puede cambiar según la etapa fenológica afectada y la progresión del déficit. Hinojosa et al. (2018) mostraron que la fenología del cultivo presenta flexibilidad frente a la disponibilidad de agua, mientras que Al-Naggar et al. (2017) evidenciaron respuestas diferenciadas ante una sequía progresiva. Por ello, la comparación entre estudios consideró las condiciones en las que se produjo el estrés y no únicamente sus efectos finales sobre el rendimiento.

La información fue agrupada en categorías relacionadas con diversidad genética y adaptación; altura y crecimiento de la planta; características de las panojas; producción y distribución de biomasa; desarrollo radicular; comportamiento hídrico; respuestas fisiológicas; eficiencia en el uso del agua; rendimiento de grano; índice de cosecha; estabilidad productiva; diferencias entre materiales costeros y de altiplano; adaptación al secano; vulnerabilidad frente al estrés hídrico; y criterios para el mejoramiento genético. Esta organización permitió reconocer las variables con mayor presencia en la literatura y examinar las conexiones existentes entre los componentes morfológicos, fisiológicos y productivos.

La clasificación temática también facilitó la identificación de los mecanismos que podrían explicar las diferencias de rendimiento. Hinojosa et al. (2018) analizaron la regulación estomática de la quinua bajo sequía, mientras que Hinojosa et al. (2018) estudiaron modificaciones en la capacidad antioxidante ocasionadas por el estrés hídrico. La incorporación de estas dimensiones permitió interpretar la adaptación como un proceso complejo y evitar que la comparación entre variedades se limitara únicamente a su producción final de grano.

### **Procedimiento de análisis y síntesis de la evidencia**

La heterogeneidad de los estudios determinó la utilización de una síntesis descriptiva y temática. No se realizó un metaanálisis debido a las diferencias existentes entre variedades, procedencia de los materiales, niveles de estrés, etapas fenológicas, duración de los experimentos, condiciones ambientales e indicadores utilizados. La síntesis narrativa permitió comparar los hallazgos sin asumir que los tratamientos aplicados o las medidas de resultado eran directamente equivalentes.

Inicialmente se analizaron las características generales de las investigaciones, incluyendo año de publicación, región de estudio, tipo de ambiente experimental y materiales evaluados. Posteriormente, la evidencia fue organizada conforme a las categorías definidas en la matriz de extracción. Dentro de cada categoría se examinaron las semejanzas y diferencias entre cultivares, así como las relaciones observadas entre respuestas fisiológicas y resultados agronómicos. Esta integración fue coherente con el enfoque de Hinojosa et al. (2018), quienes sostienen que la respuesta de la quinua frente a factores abióticos comprende mecanismos interdependientes y no características aisladas.

El análisis prestó especial atención a la estabilidad del rendimiento y a la capacidad de los materiales para mantener funciones productivas bajo sequía. Los resultados obtenidos en condiciones favorables fueron contrastados con aquellos registrados bajo déficit moderado o severo, siempre que los estudios proporcionaran esta información. Hinojosa et al. (2018) evidenciaron diferencias genotípicas en las respuestas fisiológicas de cultivares sometidos a

sequía, mientras que Al-Naggar et al. (2017) mostraron la influencia de la disponibilidad de agua sobre las brechas de rendimiento. Estas aportaciones permitieron interpretar conjuntamente tolerancia fisiológica, eficiencia hídrica y productividad.

Finalmente, se identificaron las tendencias predominantes, los indicadores más utilizados, las respuestas recurrentes y los principales vacíos de conocimiento. La síntesis examinó la disponibilidad de evaluaciones multiterritoriales, la comparación entre materiales genéticos, la validación de los resultados en campo y la integración entre variables agronómicas, fisiológicas y genómicas. Desde la perspectiva del mejoramiento, Murphy et al. (2018) destacan la necesidad de combinar herramientas convencionales y genómicas para desarrollar variedades adaptadas a nuevos ambientes. En consecuencia, el análisis final se orientó a reconocer criterios que puedan fortalecer la selección de quinua tolerante a sequía y guiar futuras investigaciones.

### 3. RESULTADOS

#### **Características generales de la evidencia sobre quinua y sequía**

La evidencia analizada muestra un interés creciente por comprender las respuestas agronómicas y fisiológicas de la quinua frente a la sequía, especialmente en regiones andinas y ambientes donde la disponibilidad de agua limita la producción. Los estudios revisados presentan una considerable diversidad en cuanto a los materiales genéticos, las condiciones experimentales, la intensidad del déficit y los indicadores utilizados. Al-Naggar et al. (2017), por ejemplo, comparó diez cultivares tolerantes a la sequía mediante características agronómicas, mientras que Gámez Guzmán (2018) examinó dos variedades en condiciones de invernadero para relacionar su comportamiento fisiológico con el rendimiento. Esta diferencia en los alcances confirma que la literatura comprende tanto evaluaciones comparativas amplias como investigaciones dirigidas a explicar los mecanismos de respuesta de materiales específicos.

Los estudios realizados en campo permitieron observar el comportamiento de los cultivares frente a la interacción entre suelo, clima y manejo agrícola. Hinojosa et al. (2018) analizaron las relaciones hídricas y el intercambio gaseoso de la quinua durante el secado del suelo en condiciones de campo, proporcionando evidencia sobre su respuesta fisiológica dentro de un ambiente productivo. Por su parte, los experimentos desarrollados en invernadero facilitaron el control de la cantidad y duración del déficit hídrico. Ambos enfoques resultaron complementarios: las condiciones controladas favorecieron el análisis de mecanismos particulares, mientras que las evaluaciones de campo permitieron comprobar el desempeño de las variedades bajo una mayor complejidad ambiental.

La literatura examinada confirma que la tolerancia a la sequía constituye una característica compleja y variable. Hinojosa et al. (2018) señalan que la respuesta de la quinua frente a los factores abióticos comprende mecanismos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y fenológicos que actúan de manera coordinada. Los resultados de los estudios revisados muestran que la intensidad, duración y etapa de ocurrencia del déficit pueden modificar las respuestas de los cultivares. Asimismo, las características del suelo, la temperatura y el manejo del cultivo influyen en la magnitud de los efectos observados.

Entre los indicadores agronómicos más utilizados se identificaron la altura de la planta, el diámetro del tallo, la longitud y diámetro de la panoja, la producción de biomasa, el rendimiento de grano y el índice de cosecha. Las investigaciones fisiológicas incorporaron variables como conductancia estomática, transpiración, fotosíntesis, potencial hídrico y eficiencia en el uso del agua. Hinojosa et al. (2018) demostraron la existencia de variaciones genotípicas en los parámetros de intercambio gaseoso de cultivares sometidos a sequía. Esta diversidad de indicadores evidencia que la adaptación no puede determinarse mediante una sola característica, pues un material puede conservar su crecimiento vegetativo sin mantener necesariamente el rendimiento de grano.

La integración de variables agronómicas y fisiológicas constituye una tendencia relevante dentro de la evidencia revisada. Los indicadores agronómicos permiten determinar los efectos finales del estrés sobre el crecimiento y la productividad, mientras que las variables fisiológicas ayudan a explicar los mecanismos responsables de las diferencias observadas. Al-Naggar et al. (2017) encontraron respuestas contrastantes entre variedades expuestas a sequía progresiva, lo que demuestra la importancia de relacionar el comportamiento fisiológico con la producción. En

conjunto, los resultados respaldan la utilización de evaluaciones integrales para seleccionar materiales con tolerancia y estabilidad productiva.

### **Diversidad genética y variabilidad agronómica de la quinua**

La diversidad genética representa uno de los principales recursos disponibles para el mejoramiento de la quinua frente a la sequía. La expansión histórica del cultivo por ambientes contrastantes favoreció la formación de materiales adaptados a diferentes condiciones de altitud, temperatura, precipitación y características edáficas. Hinojosa et al. (2018) destacan que la biodiversidad de la quinua constituye un recurso estratégico para la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático. Esta diversidad se manifiesta en diferencias relacionadas con duración del ciclo, arquitectura de la planta, desarrollo de la panoja, producción de biomasa y rendimiento.

Las variedades procedentes del altiplano se han desarrollado en ambientes caracterizados por bajas temperaturas, radiación intensa y precipitaciones variables, mientras que los materiales costeros responden a condiciones ambientales diferentes. Bazile et al. (2016) explican que la expansión global del cultivo evidencia una capacidad considerable de adaptación, pero también plantea límites vinculados con la respuesta específica de los genotipos a cada ambiente. Los resultados revisados indican que la procedencia de los materiales puede influir en sus estrategias frente al déficit hídrico, aunque esta relación debe comprobarse mediante ensayos realizados bajo condiciones comparables.

La variabilidad agronómica se expresa en características como altura, ramificación, longitud de panoja, precocidad y rendimiento. Las diferencias observadas permiten identificar materiales con rasgos potencialmente favorables para el mejoramiento, pero también dificultan la utilización de criterios uniformes de selección. Al-Naggar et al. (2017) evidenció variaciones entre cultivares tolerantes a sequía al evaluar diferentes características agronómicas. Estos resultados muestran que la tolerancia no se distribuye de manera homogénea y que los materiales deben compararse mediante múltiples variables.

Los avances genómicos han ampliado las posibilidades de estudiar esta diversidad y relacionarla con características adaptativas. Jarvis et al. (2017) aportaron una referencia fundamental mediante la secuenciación del genoma de la quinua, que facilita la identificación de regiones vinculadas con domesticación, calidad y respuesta frente a factores ambientales. No obstante, la información molecular requiere relacionarse con evaluaciones fenotípicas que permitan comprobar la expresión de los caracteres bajo déficit hídrico. Por ello, la caracterización agronómica continúa siendo indispensable para los programas de selección.

La conservación de variedades locales y materiales de germoplasma resulta fundamental para mantener las opciones de mejoramiento. Murphy et al. (2018) sostienen que la amplitud genética de la quinua ofrece posibilidades para desarrollar materiales adaptados a nuevos ambientes y sistemas productivos. Sin embargo, los cultivares locales pueden presentar limitaciones relacionadas con uniformidad, rendimiento o características de cosecha. Los procesos de mejoramiento deben aprovechar sus rasgos adaptativos sin perder de vista la productividad, calidad del grano y aceptación de los agricultores.

En conjunto, los resultados indican que la identificación de variedades tolerantes requiere evaluaciones desarrolladas bajo diferentes condiciones hídricas, ambientes y ciclos agrícolas. La diversidad observada proporciona una base amplia para la selección, pero también genera desafíos relacionados con la comparación de los resultados. La utilización de procedimientos comunes y la evaluación simultánea de variables agronómicas, fisiológicas y productivas podrían mejorar la identificación de materiales con adaptación estable.

### **Altura y crecimiento de las plantas bajo condiciones de sequía**

La altura de la planta se identificó como uno de los indicadores agronómicos utilizados con mayor frecuencia para evaluar el efecto de la sequía. La disminución de la disponibilidad de agua puede reducir la expansión celular y limitar el crecimiento vegetativo, aunque la magnitud de esta respuesta varía entre cultivares. Al-Naggar et al. (2017) encontraron diferencias entre genotipos sometidos a condiciones moderadas y severas de estrés, lo que demuestra

que la reducción de la altura depende tanto de la intensidad de la sequía como de las características genéticas del material.

Los resultados también muestran que una mayor altura no representa necesariamente una mejor adaptación. Algunos cultivos pueden reducir su crecimiento vegetativo como estrategia para disminuir la demanda hídrica y conservar recursos para completar el ciclo reproductivo. Hinojosa et al. (2018) explican que las respuestas de la quinua frente a factores abióticos comprenden modificaciones del crecimiento y de la asignación de biomasa. Por ello, la altura debe analizarse junto con el rendimiento, la biomasa y el índice de cosecha para determinar si la reducción observada constituye un daño productivo o un ajuste adaptativo.

La etapa fenológica en la que ocurre el déficit influye de manera importante en el crecimiento. Cuando el estrés se presenta durante el establecimiento, puede limitar el desarrollo inicial y reducir la capacidad posterior de la planta para explorar el suelo. Durante la fase vegetativa, la restricción hídrica afecta la formación de hojas y la acumulación de materia seca. Hinojosa et al. (2018) demostraron que la fenología de la quinua presenta flexibilidad frente a la disponibilidad de agua, lo que permite que determinados materiales modifiquen la duración de sus etapas como respuesta al estrés.

La evaluación temporal del crecimiento proporciona información más completa que una medición realizada únicamente al finalizar el ciclo. El registro periódico de la altura y la tasa de crecimiento permite identificar el momento en que aparecen los efectos del estrés y determinar si las plantas recuperan su desarrollo después del restablecimiento del agua. Al-Naggar et al. (2017) mostraron que las variedades pueden presentar respuestas diferentes durante la progresión de la sequía. Esta evidencia respalda la necesidad de incorporar mediciones sucesivas para caracterizar la resistencia y la capacidad de recuperación.

En síntesis, la altura constituye un indicador sencillo y útil para describir los efectos del déficit hídrico, pero posee una capacidad limitada cuando se interpreta de manera aislada. Su valor aumenta cuando se relaciona con la duración del ciclo, la producción de biomasa y el rendimiento. Los resultados examinados indican que los materiales de menor reducción relativa pueden presentar una mayor estabilidad del crecimiento, aunque esta característica debe validarse mediante la producción final de grano.

### **Características de la panoja como indicadores de adaptación**

La panoja constituye la principal estructura reproductiva de la quinua y sus características se encuentran directamente relacionadas con la formación del rendimiento. Entre las variables examinadas se identificaron la longitud, diámetro, densidad y arquitectura de la panoja. Al-Naggar et al. (2017) incorporó características agronómicas de estas estructuras en la comparación de cultivos tolerantes a sequía, evidenciando su utilidad para reconocer diferencias morfológicas entre materiales.

El déficit hídrico puede reducir el crecimiento de la panoja, limitar la formación de flores y afectar posteriormente el número de granos. Sin embargo, la intensidad de estas modificaciones depende del cultivar y del momento en que ocurre el estrés. Al-Naggar et al. (2017) observaron diferencias entre genotipos de quinua sometidos a distintos niveles de sequía, confirmando que los caracteres reproductivos presentan respuestas variables. Los materiales capaces de conservar el desarrollo de sus estructuras reproductivas pueden disponer de mejores posibilidades para mantener la producción.

La longitud o el diámetro de la panoja no garantizan por sí mismos un mayor rendimiento. Una estructura de gran tamaño puede presentar un reducido número de granos o dificultades durante el llenado si el déficit hídrico continúa en la etapa reproductiva. Hinojosa et al. (2018) mostraron que la respuesta de la quinua depende de la relación entre disponibilidad de agua y fenología, por lo que la interpretación de las características de la panoja debe considerar el momento de aparición del estrés. De esta manera, una panoja aparentemente bien desarrollada podría experimentar pérdidas posteriores en el peso de los granos.

Los resultados indican que las variables morfológicas de la panoja adquieren mayor valor cuando se analizan junto con el número de semillas, su peso y el rendimiento final. Esta integración permite determinar si la conservación de la

estructura reproductiva se traduce efectivamente en una ventaja productiva. En los programas de mejoramiento, la longitud y diámetro de la panoja pueden utilizarse como criterios preliminares de selección, pero los materiales identificados deben validarse mediante evaluaciones de rendimiento bajo condiciones de estrés.

### **Producción y distribución de biomasa frente al déficit hídrico**

La producción de biomasa representa un indicador relevante del efecto acumulado de la sequía sobre el crecimiento de la quinua. La reducción del agua disponible puede provocar el cierre de los estomas, disminuir la entrada de dióxido de carbono y limitar la fotosíntesis. Hinojosa et al. (2018) observaron modificaciones en el intercambio gaseoso y las relaciones hídricas de la quinua durante el secado del suelo. Cuando estas respuestas se mantienen durante periodos prolongados, disminuyen la acumulación de materia seca y afectan el desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos.

Las variedades presentan diferencias en su capacidad para mantener la biomasa bajo estrés. Algunas reducen rápidamente el crecimiento aéreo para disminuir el consumo de agua, mientras que otras mantienen durante más tiempo la actividad fotosintética. Hinojosa et al. (2018) identificaron variaciones genotípicas en parámetros de intercambio gaseoso, lo que ayuda a explicar las diferencias en la acumulación de biomasa. Sin embargo, la conservación del crecimiento no siempre se traduce en un mejor rendimiento, pues la producción final depende de la distribución de los recursos dentro de la planta.

Bajo condiciones de sequía, determinados materiales pueden incrementar proporcionalmente la asignación de biomasa hacia las raíces. Hinojosa et al. (2018) describen el ajuste del crecimiento radicular como parte de las respuestas de la quinua frente a factores abióticos. Esta estrategia puede mejorar la exploración del suelo y favorecer el acceso a reservas de agua, aunque también representa una inversión de recursos que podría reducir el crecimiento de hojas, tallos y estructuras reproductivas. Por esta razón, la biomasa radicular debe compararse con la biomasa aérea y el rendimiento.

La biomasa total tampoco constituye por sí sola un indicador suficiente de adaptación productiva. Una variedad puede acumular abundante materia seca y destinar una proporción limitada a la formación de granos. El índice de cosecha permite establecer qué parte de la biomasa producida se transforma en rendimiento económicamente aprovechable. Los resultados revisados muestran que la interpretación conjunta de biomasa e índice de cosecha proporciona una valoración más precisa de la eficiencia productiva de los cultivares sometidos a déficit hídrico.

En conjunto, la producción y distribución de biomasa permiten reconocer distintas estrategias de adaptación. Algunos materiales conservan el crecimiento aéreo, mientras que otros priorizan el desarrollo radicular o reducen su tamaño para limitar la demanda hídrica. La utilidad agronómica de estas respuestas debe determinarse mediante su relación con el rendimiento, la estabilidad y la capacidad de recuperación después del estrés.

### **Desarrollo radicular y adaptación de la quinua a la sequía**

El sistema radicular constituye uno de los componentes más importantes de la adaptación de la quinua al déficit hídrico, debido a que determina la capacidad de las plantas para explorar el suelo y acceder a las reservas de agua disponibles. Las diferencias entre variedades pueden expresarse en la profundidad, longitud, densidad y distribución de las raíces. Hinojosa et al. (2018) explican que la plasticidad radicular forma parte de las respuestas morfológicas desarrolladas por la quinua frente a los factores abióticos. Los materiales capaces de ajustar su crecimiento radicular pueden presentar ventajas en ambientes donde la humedad se distribuye de manera irregular.

Las raíces profundas permiten aprovechar el agua almacenada en las capas inferiores del suelo, especialmente cuando disminuye la humedad superficial. Sin embargo, la profundidad no constituye la única característica relevante, pues la presencia de raíces laterales y la distribución del sistema también influyen en la absorción. Hinojosa et al. (2018) señalan que la resistencia de la quinua frente a condiciones abióticas adversas se relaciona con distintos mecanismos de ajuste, entre los cuales se encuentra la capacidad de mantener la captación de agua. Por consiguiente, la evaluación radicular debe considerar tanto la extensión del sistema como su eficiencia funcional.

La producción de biomasa radicular y la relación entre raíces y parte aérea aportan información sobre la estrategia de asignación de recursos de cada variedad. Bajo sequía, algunos materiales incrementan proporcionalmente la inversión en raíces, mientras disminuyen el crecimiento de hojas y tallos. Esta respuesta puede mejorar temporalmente la absorción de agua, pero también puede limitar la superficie fotosintética y la producción de biomasa aérea. Los resultados revisados muestran que una elevada relación raíz-parte aérea no debe interpretarse automáticamente como tolerancia, ya que su utilidad depende de la capacidad de la planta para conservar el rendimiento.

La regulación fisiológica también se encuentra vinculada con las señales generadas por el sistema radicular. Hinojosa et al. (2018) examinaron la función del ácido abscísico procedente de las raíces en el control estomático de la quinua durante la sequía. Esta comunicación entre las raíces y la parte aérea permite ajustar la transpiración antes de que se produzca una deshidratación intensa de los tejidos. Las diferencias varietales en estos mecanismos podrían explicar por qué determinados materiales responden de forma más rápida ante la disminución de humedad.

Los estudios desarrollados en condiciones controladas facilitan la extracción y medición de raíces, aunque pueden restringir su crecimiento por el tamaño de los recipientes utilizados. En cambio, las evaluaciones de campo reproducen condiciones más cercanas a los sistemas productivos, pero presentan dificultades para recuperar el sistema radicular completo. Estas diferencias metodológicas limitan la comparación entre investigaciones y explican la menor disponibilidad de datos radiculares frente a otras variables agronómicas. Por ello, los resultados identifican el análisis de raíces como una prioridad para futuras investigaciones sobre tolerancia a la sequía.

### **Comportamiento hídrico de las variedades de quinua**

El comportamiento hídrico comprende las respuestas mediante las cuales la planta regula la absorción, distribución y pérdida de agua. Durante la sequía, las variedades pueden mantener diferentes niveles de hidratación según la profundidad de sus raíces, la regulación de la transpiración y su capacidad de ajuste osmótico. Hinojosa et al. (2018) demostraron que el secado del suelo modifica las relaciones hídricas y el intercambio gaseoso de la quinua cultivada en campo. Estos cambios aparecen progresivamente y pueden preceder a la reducción visible del crecimiento.

La regulación estomática constituye uno de los mecanismos más importantes para disminuir la pérdida de agua. El cierre de los estomas reduce la transpiración, pero también limita la entrada de dióxido de carbono necesario para la fotosíntesis. Hinojosa et al. (2018) encontraron que las señales originadas en las raíces participan en la regulación estomática de la quinua bajo sequía. Esta respuesta permite conservar agua durante periodos de disponibilidad limitada, aunque un cierre intenso o prolongado puede disminuir la producción de biomasa y el rendimiento.

Las variedades pueden adoptar estrategias contrastantes frente a una condición hídrica similar. Algunos materiales mantienen durante más tiempo la apertura estomática y la actividad fotosintética, mientras que otros responden rápidamente mediante la reducción de la transpiración. Al-Naggar et al. (2017) identificaron diferencias en la sensibilidad de dos variedades sometidas a sequía progresiva. La ventaja de cada estrategia depende de la duración del estrés: el mantenimiento de la actividad puede favorecer el crecimiento durante periodos breves, mientras que una regulación más conservadora puede resultar beneficiosa cuando la sequía se prolonga.

Entre los indicadores empleados para caracterizar el estado hídrico se encuentran el potencial hídrico, el contenido relativo de agua, la conductancia estomática y la tasa de transpiración. Hinojosa et al. (2018) utilizaron parámetros de intercambio gaseoso e isótopos estables de carbono y nitrógeno para analizar las diferencias entre cultivares bajo sequía. La combinación de estos indicadores permite determinar si un material conserva la hidratación mediante una mayor captación de agua, una reducción de las pérdidas o ajustes metabólicos.

Los resultados muestran que la intensidad y duración de la sequía condicionan la efectividad de estas respuestas. Un déficit moderado puede activar mecanismos adaptativos sin ocasionar daños irreversibles, mientras que una restricción severa puede superar la capacidad de regulación de la planta. Por tanto, el comportamiento hídrico debe evaluarse mediante mediciones sucesivas que permitan reconocer la aparición del estrés, la respuesta de los cultivares y su posible recuperación después del restablecimiento del agua.

### **Respuestas fisiológicas de la quinua frente a la sequía**

Las respuestas fisiológicas permiten comprender los procesos que explican las diferencias agronómicas observadas entre variedades. Gámez Guzmán (2018) integró la evaluación del rendimiento con la caracterización fisiológica de dos variedades sometidas a déficit hídrico en condiciones de invernadero. Este enfoque evidencia que determinadas alteraciones fisiológicas pueden detectarse antes de que aparezcan reducciones visibles en la altura, biomasa o producción de grano. En consecuencia, estos indicadores poseen utilidad para la identificación temprana de materiales tolerantes.

La fotosíntesis constituye uno de los procesos más sensibles a la disminución de agua. El cierre estomático reduce el ingreso de dióxido de carbono y limita la asimilación, mientras que los periodos prolongados de estrés pueden afectar directamente el funcionamiento del aparato fotosintético. Hinojosa et al. (2018) observaron cambios en el intercambio gaseoso de la quinua durante el secado del suelo. La capacidad para mantener niveles funcionales de fotosíntesis sin experimentar pérdidas excesivas de agua puede representar una ventaja adaptativa.

La conductancia estomática y la transpiración aportan información sobre la estrategia hídrica de cada cultivar. Hinojosa et al. (2018) identificaron una variación genotípica significativa en los parámetros de intercambio gaseoso de diez cultivares de quinua cultivados bajo sequía. Estas diferencias demuestran que los materiales no regulan de la misma manera la pérdida de agua ni mantienen niveles equivalentes de asimilación de carbono. La evaluación conjunta de ambos procesos permite reconocer cultivares con un equilibrio favorable entre conservación hídrica y actividad fotosintética.

La sequía también puede generar estrés oxidativo mediante la acumulación de especies reactivas de oxígeno, capaces de ocasionar daños en las membranas y estructuras celulares. Hinojosa et al. (2018) comprobaron que la capacidad antioxidante de la quinua cambia en respuesta al déficit hídrico y presenta variaciones entre materiales. Una actividad antioxidante eficiente puede disminuir el daño celular y contribuir al mantenimiento de los procesos fisiológicos durante el estrés.

El ajuste osmótico representa otro mecanismo relacionado con la tolerancia. Las plantas pueden acumular solutos compatibles que contribuyen a conservar agua dentro de las células y mantener la turgencia. Hinojosa et al. (2018) incluyen estos ajustes entre las respuestas de la quinua frente a factores abióticos. No obstante, la medición de compuestos osmoprotectores, estabilidad de membranas y actividad antioxidante requiere equipos y procedimientos especializados, lo que limita su incorporación rutinaria en algunos programas de mejoramiento.

En conjunto, los resultados muestran que ninguna variable fisiológica permite explicar de manera aislada la tolerancia a la sequía. La fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática, estado hídrico y protección antioxidante actúan de forma interdependiente. La combinación de indicadores simples y confiables con variables agronómicas puede facilitar la selección de materiales sin aumentar excesivamente los costos de evaluación.

### **Eficiencia en el uso del agua como criterio de selección**

La eficiencia en el uso del agua representa una característica relevante para seleccionar variedades destinadas a ambientes con disponibilidad hídrica limitada. Este indicador expresa la relación entre el agua utilizada y la biomasa o rendimiento obtenido. Hinojosa et al. (2018) utilizaron indicadores de consumo hídrico para analizar la respuesta fenológica de la quinua frente a la sequía, demostrando que la relación entre desarrollo y disponibilidad de agua cambia según el momento en que se presenta el déficit.

La literatura emplea diferentes procedimientos para calcular la eficiencia hídrica. Desde una perspectiva agronómica, puede relacionarse el rendimiento de grano o la biomasa total con la cantidad de agua consumida. En estudios fisiológicos, se utiliza la relación entre asimilación fotosintética y transpiración, así como el análisis de isótopos estables de carbono. Hinojosa et al. (2018) incorporaron esta última aproximación para comparar cultivares de quinua bajo sequía. La diversidad de procedimientos proporciona información complementaria, pero dificulta la comparación directa entre investigaciones.

Los materiales también pueden presentar estrategias diferentes para alcanzar una mayor eficiencia. Algunas variedades reducen rápidamente la transpiración y conservan el agua disponible, mientras que otras mantienen la actividad fotosintética y el crecimiento durante más tiempo. Al-Naggar et al. (2017) evidenciaron que dos variedades sometidas a sequía progresiva presentaron diferentes niveles de sensibilidad y regulación. La utilidad de cada respuesta depende de la intensidad y duración del estrés, así como de la posibilidad de recuperación posterior.

Una reducción del consumo de agua no representa necesariamente una ventaja agronómica cuando se acompaña de una disminución pronunciada del rendimiento. Por esta razón, la eficiencia debe analizarse conjuntamente con la productividad. Al-Naggar et al. (2017) demostraron, mediante la modelación de las brechas de rendimiento en el altiplano boliviano, que la disponibilidad y gestión del agua influyen directamente en la producción alcanzable. El objetivo del mejoramiento debe ser identificar materiales capaces de mantener una relación favorable entre consumo hídrico y producción de grano.

Los resultados indican que la estabilidad de la eficiencia hídrica también debe comprobarse en diferentes ambientes y ciclos agrícolas. Una variedad puede presentar valores favorables en condiciones controladas y comportarse de manera distinta cuando cambian el suelo, la temperatura o la distribución de las precipitaciones. En consecuencia, la eficiencia en el uso del agua constituye un criterio de selección importante, pero necesita complementarse con evaluaciones de rendimiento, estabilidad y adaptación territorial.

### **Rendimiento de grano bajo condiciones de déficit hídrico**

El rendimiento de grano constituye el principal criterio agronómico para determinar si una variedad tolerante a la sequía posee utilidad productiva. La supervivencia o conservación del crecimiento no resultan suficientes cuando el material no consigue formar una cosecha económicamente aceptable. Al-Naggar et al. (2017) comparó cultivares de quinua tolerantes a la sequía y mostró la importancia de integrar diferentes características agronómicas para identificar los materiales con mejor comportamiento.

La respuesta del rendimiento depende de la intensidad y duración del déficit, además de la etapa fenológica en la que se presenta. La sequía durante la floración puede reducir la formación y fecundación de las flores, mientras que la falta de agua durante el llenado disminuye el peso de las semillas. Hinojosa et al. (2018) demostraron que la flexibilidad fenológica influye en la respuesta de la quinua frente a la disponibilidad hídrica. Los materiales capaces de ajustar su ciclo pueden evitar parcialmente la coincidencia de sus etapas más sensibles con los periodos de mayor sequía.

El rendimiento final se encuentra determinado por componentes como el número de panojas, cantidad de granos y peso individual de las semillas. El déficit hídrico puede afectar estos componentes de manera diferente, por lo que variedades con rendimientos semejantes pueden haber seguido estrategias productivas distintas. Al-Naggar et al. (2017) identificaron asociaciones entre la tolerancia a la sequía y otros caracteres de cinco genotipos sometidos a niveles moderados y severos de estrés. Estos resultados respaldan la evaluación conjunta del rendimiento y sus componentes.

La estabilidad productiva permite diferenciar los materiales que alcanzan un rendimiento elevado únicamente en condiciones favorables de aquellos que mantienen niveles aceptables bajo estrés. Al-Naggar et al. (2017) mostraron que las brechas de rendimiento de la quinua cambian con la disponibilidad de agua en el altiplano boliviano. Esta evidencia indica que la selección no debe concentrarse exclusivamente en el valor máximo obtenido, sino también en la reducción relativa producida por el déficit y en la consistencia del comportamiento entre ambientes.

En síntesis, el rendimiento constituye un indicador indispensable, pero debe interpretarse considerando el nivel productivo inicial, la magnitud de la pérdida, los componentes afectados y las condiciones experimentales. Los programas de mejoramiento necesitan combinar productividad y estabilidad para evitar la selección de materiales con alto potencial, pero excesivamente vulnerables a la variabilidad hídrica.

### **Índice de cosecha y eficiencia productiva de las variedades**

El índice de cosecha representa la proporción de la biomasa total que la planta destina a la producción de grano y permite analizar la eficiencia con la que los recursos acumulados se transforman en rendimiento aprovechable. Este indicador resulta particularmente importante en condiciones de sequía, porque el déficit hídrico puede afectar de manera diferente el crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo. Al-Naggar et al. (2017) demostraron que los genotipos de quinua presentan respuestas agronómicas contrastantes ante niveles moderados y severos de estrés, lo que evidencia la necesidad de examinar la producción de biomasa junto con el rendimiento final.

Cuando la sequía reduce el rendimiento en una proporción superior a la disminución de la biomasa total, el índice de cosecha tiende a descender. Esta respuesta puede producirse cuando el estrés afecta la floración, la formación de semillas o el llenado de los granos después de que la planta ha desarrollado una cantidad considerable de estructuras vegetativas. Hinojosa et al. (2018) mostraron que la respuesta productiva de la quinua depende de la etapa fenológica en la que ocurre el déficit hídrico. Por consiguiente, el índice debe interpretarse considerando tanto la intensidad del estrés como el momento de su aparición.

Una elevada producción de materia seca no garantiza un rendimiento proporcionalmente alto. Determinadas variedades pueden conservar la altura, el área foliar y la biomasa bajo déficit hídrico, pero presentar limitaciones para movilizar los fotoasimilados hacia la panoja y los granos. En cambio, otros materiales pueden reducir el crecimiento vegetativo y mantener una distribución más eficiente de los recursos hacia las estructuras reproductivas. Las diferencias fisiológicas documentadas por Hinojosa et al. (2018) ayudan a explicar por qué los cultivares no mantienen el mismo equilibrio entre crecimiento, conservación de agua y producción.

Los resultados revisados indican que el índice de cosecha constituye un criterio complementario para identificar materiales eficientes, pero no debe utilizarse de manera aislada. Una variedad con poca biomasa y bajo rendimiento podría presentar un índice aparentemente elevado sin representar una alternativa productiva adecuada. Por ello, su interpretación debe incluir la biomasa total, el rendimiento absoluto, la magnitud de la reducción provocada por la sequía y la estabilidad observada en diferentes ambientes.

### **Vulnerabilidad y estabilidad del rendimiento frente al estrés hídrico**

La vulnerabilidad productiva expresa el grado en que el rendimiento de una variedad disminuye cuando se enfrenta a condiciones de déficit hídrico. Los estudios revisados muestran que materiales con una producción semejante bajo disponibilidad adecuada de agua pueden responder de manera diferente durante la sequía. Al-Naggar et al. (2017) identificaron diferencias entre genotipos expuestos a estrés moderado y severo, confirmando que la sensibilidad depende de las características del material y de la intensidad de la restricción hídrica.

La comparación entre condiciones con y sin estrés permite estimar la reducción absoluta y relativa del rendimiento. Sin embargo, una pérdida porcentual pequeña no significa necesariamente que una variedad represente la mejor alternativa, pues podría corresponder a un material con bajo rendimiento inicial. Al-Naggar et al. (2017) evidenció la importancia de comparar diversos caracteres agronómicos para identificar cultivares tolerantes. En consecuencia, la selección debe considerar simultáneamente el rendimiento potencial, la producción conservada durante el estrés y la magnitud de las pérdidas.

La estabilidad adquiere especial importancia en territorios donde la cantidad y distribución de las precipitaciones cambian entre ciclos agrícolas. Una variedad estable no necesariamente registra el mayor rendimiento en todos los ambientes, pero conserva un comportamiento relativamente predecible frente a condiciones variables. Los modelos desarrollados por Al-Naggar et al. (2017) muestran que las brechas de rendimiento de la quinua están estrechamente relacionadas con la disponibilidad de agua. Esta relación confirma que la evaluación de los materiales debe incorporar escenarios hídricos contrastantes.

La literatura utiliza diferentes índices para medir tolerancia, susceptibilidad y estabilidad, lo que dificulta la comparación directa entre investigaciones. Algunos estudios analizan la reducción porcentual del rendimiento, mientras que otros relacionan la producción bajo estrés con aquella obtenida en condiciones favorables. Esta

heterogeneidad metodológica evidencia la necesidad de utilizar indicadores claramente definidos y acompañarlos con los valores productivos originales. La estandarización de determinados criterios facilitaría la identificación de materiales que combinen productividad y tolerancia.

Los resultados indican que la selección realizada exclusivamente en ambientes con disponibilidad adecuada de agua puede favorecer materiales con alto potencial productivo, pero vulnerables a la sequía. Por esta razón, los programas de mejoramiento deben establecer ensayos específicos bajo distintos niveles de déficit y repetirlos durante varios ciclos. La estabilidad productiva debe entenderse como una característica complementaria del rendimiento, especialmente cuando el objetivo consiste en desarrollar variedades destinadas a sistemas agrícolas expuestos a variabilidad climática.

### **Comparación entre variedades costeras y del altiplano bajo déficit hídrico**

La comparación entre variedades costeras y del altiplano permite analizar la influencia de la procedencia geográfica sobre las respuestas de la quinua frente al déficit hídrico. La amplia distribución histórica de la especie ha favorecido la formación de grupos adaptados a condiciones contrastantes de altitud, temperatura, radiación, precipitación y suelo. Hinojosa et al. (2018) destacan que esta biodiversidad constituye una base fundamental para la adaptación del cultivo al cambio climático y para el desarrollo de nuevos materiales.

Las variedades del altiplano han sido seleccionadas bajo ambientes caracterizados por bajas temperaturas, elevada radiación y disponibilidad irregular de agua. Estas condiciones pueden favorecer materiales capaces de completar su ciclo bajo precipitaciones limitadas o de conservar determinados procesos fisiológicos durante periodos secos. Hinojosa et al. (2018) señalan que la quinua presenta diferentes mecanismos de resistencia frente a factores abióticos adversos, los cuales se encuentran asociados con la diversidad y la adaptación ambiental de la especie.

Los materiales costeros se han desarrollado bajo condiciones térmicas y estacionales diferentes, por lo que pueden presentar otra duración del ciclo, arquitectura y patrón de crecimiento. La expansión internacional de la quinua ha mostrado que la adaptación de un material no depende exclusivamente de la resistencia general de la especie. Bazile et al. (2016) advierten que el traslado de cultivares hacia nuevos ambientes posee límites vinculados con el fotoperiodo, clima y características productivas. En consecuencia, la procedencia geográfica puede aportar información inicial, pero no sustituye la evaluación experimental.

Las comparaciones entre grupos permiten identificar estrategias como la precocidad, la regulación de la transpiración y el mantenimiento de la actividad fotosintética. Las variedades de ciclo corto pueden completar las fases reproductivas antes de los periodos de mayor sequía, lo que representa un mecanismo de escape. En cambio, los materiales con ciclos prolongados requieren mantener su funcionamiento durante un periodo mayor de exposición. La flexibilidad fenológica identificada por Hinojosa et al. (2018) demuestra que la duración y ajuste de las etapas influyen en la utilización del agua y en la respuesta productiva.

Las evaluaciones controladas permiten aplicar niveles semejantes de estrés a variedades de diferente procedencia, mientras que los estudios de campo muestran su comportamiento bajo condiciones ambientales reales. Ambos enfoques son necesarios para diferenciar los efectos genéticos de las respuestas provocadas por el ambiente. Los resultados indican que la combinación de características procedentes de grupos costeros y del altiplano podría ampliar las posibilidades del mejoramiento, aunque los nuevos materiales necesitarían validarse en varios ambientes y ciclos productivos.

### **Adaptación de variedades de quinua a condiciones de secano**

La producción de quinua en secano depende principalmente del agua proporcionada por las precipitaciones y de la capacidad del suelo para almacenarla. Estos sistemas se encuentran expuestos a variaciones en el inicio, cantidad y distribución de las lluvias, lo que puede generar periodos de déficit durante etapas críticas. Al-Naggar et al. (2017) demostraron que la disponibilidad hídrica influye en las brechas de rendimiento de la quinua en el altiplano boliviano.

Por ello, la adaptación al secano requiere materiales capaces de responder a condiciones variables y no únicamente a una reducción constante del agua.

El establecimiento inicial representa una etapa determinante porque las plantas jóvenes poseen sistemas radiculares poco desarrollados y una capacidad limitada para explorar el suelo. Un déficit durante la germinación o emergencia puede reducir la densidad de plantas y comprometer el rendimiento desde el inicio del ciclo. Las variedades adaptadas necesitan establecerse rápidamente y desarrollar raíces capaces de aprovechar la humedad disponible antes de que se intensifique la sequía.

La precocidad constituye una de las estrategias observadas para afrontar ambientes de secano. Los materiales de ciclo corto pueden completar la floración y formación de granos antes de que disminuyan las reservas hídricas. Hinojosa et al. (2018) mostraron que la flexibilidad fenológica de la quinua modifica los indicadores de consumo de agua en respuesta al estrés. Sin embargo, un ciclo excesivamente corto puede limitar la acumulación de biomasa y reducir el rendimiento potencial, por lo que la precocidad debe equilibrarse con la capacidad productiva.

El desarrollo radicular y la regulación de la transpiración representan estrategias complementarias. Hinojosa et al. (2018) comprobaron que la quinua modifica el intercambio gaseoso y sus relaciones hídricas durante el secado del suelo. Esta regulación puede prolongar la disponibilidad interna de agua, aunque una disminución intensa de la actividad fotosintética puede afectar el crecimiento. Las variedades adaptadas al secano deben mantener un equilibrio entre la conservación del recurso y la producción de biomasa y grano.

Las características edáficas también determinan la intensidad del estrés experimentado por las plantas. Los suelos profundos y con mayor capacidad de retención pueden amortiguar los periodos sin lluvia, mientras que los suelos superficiales o degradados pierden humedad con mayor rapidez. En consecuencia, la adaptación no depende exclusivamente del genotipo, sino de su interacción con el suelo, el clima y el manejo. Los resultados respaldan la necesidad de seleccionar los materiales en ambientes representativos de las zonas donde serán cultivados.

### **Estrategias morfológicas de adaptación frente a la sequía**

Las modificaciones morfológicas forman parte de las respuestas mediante las cuales la quinua ajusta su crecimiento a la disponibilidad limitada de agua. Hinojosa et al. (2018) identifican cambios en el desarrollo radicular, área foliar, biomasa y fenología entre los mecanismos relacionados con la adaptación a factores abióticos. Estas respuestas pueden reducir la demanda hídrica, mejorar la captación de agua o facilitar que la planta complete su ciclo antes de que el estrés alcance niveles severos.

El crecimiento radicular representa una de las principales estrategias morfológicas. Las raíces profundas pueden acceder a reservas localizadas en capas inferiores, mientras que una mayor distribución lateral facilita el aprovechamiento de la humedad superficial después de precipitaciones ligeras. No obstante, el incremento de biomasa radicular exige recursos que podrían destinarse a hojas, tallos o estructuras reproductivas. Por consiguiente, la ventaja de esta respuesta depende de que contribuya a conservar la producción.

La reducción del área foliar constituye otra forma de disminuir las pérdidas por transpiración. Una superficie menor reduce la exposición al ambiente y puede prolongar la disponibilidad interna de agua, pero también limita la captación de radiación y la capacidad fotosintética. Al-Naggar et al. (2017) demostraron que las variedades presentan diferentes niveles de sensibilidad y ajuste frente a la sequía progresiva. Esto indica que la disminución del crecimiento foliar puede variar según el material y la intensidad del estrés.

La altura, ramificación y arquitectura de la planta también pueden modificarse durante la restricción hídrica. Los cultivares de menor tamaño podrían demandar menos agua para mantener sus tejidos, aunque una reducción excesiva del crecimiento puede limitar la biomasa y el número de estructuras productivas. De manera semejante, la disminución de la longitud o diámetro de la panoja puede reflejar una estrategia de ajuste, pero también afectar directamente la capacidad para formar granos. Al-Naggar et al. (2017) mostró la utilidad de estas variables para diferenciar el comportamiento agronómico de cultivares tolerantes.

La plasticidad morfológica permite que una variedad modifique su desarrollo de acuerdo con las condiciones del ambiente. Sin embargo, una respuesta altamente plástica no siempre representa una ventaja si los ajustes provocan pérdidas productivas importantes. Los resultados muestran que las variables morfológicas son útiles por su facilidad de medición y bajo costo, pero necesitan relacionarse con indicadores fisiológicos, rendimiento e índice de cosecha. Esta integración permite distinguir entre adaptaciones funcionales y simples manifestaciones del daño ocasionado por la sequía.

Principio del formulario

Final del formulario

### **Mecanismos fisiológicos relacionados con la tolerancia a sequía**

Los mecanismos fisiológicos permiten que la quinua regule el consumo de agua y proteja sus tejidos cuando disminuye la humedad del suelo. La regulación estomática constituye una de las primeras respuestas frente al déficit hídrico, ya que el cierre de los estomas reduce la transpiración y retrasa la deshidratación. Hinojosa et al. (2018) analizaron la participación de las señales originadas en las raíces en el control estomático de la quinua sometida a sequía. Este mecanismo favorece la conservación del agua, pero también limita la entrada de dióxido de carbono y puede reducir la fotosíntesis.

Las variedades tolerantes necesitan mantener un equilibrio entre la disminución de la pérdida de agua y la conservación de la actividad fotosintética. Un cierre estomático excesivamente temprano puede proteger temporalmente la hidratación, aunque reduce la producción de fotoasimilados necesarios para el crecimiento y la formación de granos. Hinojosa et al. (2018) identificaron variaciones genotípicas en los parámetros de intercambio gaseoso de diez cultivares bajo sequía. Estas diferencias indican que los materiales pueden alcanzar distintos equilibrios entre conservación hídrica y asimilación de carbono.

El ajuste osmótico constituye otro mecanismo que ayuda a mantener la turgencia celular durante la reducción del potencial hídrico. La acumulación de solutos compatibles permite conservar agua dentro de las células y sostener determinados procesos metabólicos. Hinojosa et al. (2018) explican que estas respuestas forman parte de la compleja adaptación de la quinua frente a factores abióticos. Sin embargo, la magnitud del ajuste puede variar entre genotipos y según la intensidad del estrés.

La sequía también favorece la formación de especies reactivas de oxígeno, las cuales pueden dañar las membranas, proteínas y estructuras celulares. Frente a esta situación, las plantas activan mecanismos antioxidantes destinados a disminuir el deterioro oxidativo. Hinojosa et al. (2018) observaron variaciones en la capacidad antioxidante de la quinua sometida a estrés por sequía. Los materiales con sistemas de protección más eficientes podrían conservar durante más tiempo la estabilidad celular y el funcionamiento fisiológico.

La estabilidad de las membranas constituye un indicador complementario de tolerancia porque refleja el nivel de daño ocasionado por el estrés. Cuando las membranas pierden su integridad, se alteran el transporte de sustancias, la regulación osmótica y numerosos procesos metabólicos. La incorporación de este indicador puede ayudar a diferenciar variedades que mantienen su funcionamiento de aquellas que únicamente reducen el crecimiento como consecuencia del daño.

Los resultados muestran que la tolerancia fisiológica depende de varios mecanismos interrelacionados y no de una única respuesta. La regulación estomática, el ajuste osmótico, la protección antioxidante y la estabilidad de las membranas actúan conjuntamente para conservar el estado hídrico y reducir el daño celular. Por esta razón, los programas de mejoramiento deberían combinar indicadores fisiológicos con variables agronómicas y productivas para evitar la selección de materiales que presenten respuestas favorables en laboratorio, pero un rendimiento insuficiente en campo.

### **Importancia de la etapa fenológica durante la ocurrencia del estrés**

La etapa fenológica en la que se presenta la sequía determina en gran medida la magnitud de sus efectos sobre la quinua. El cultivo no mantiene el mismo nivel de sensibilidad durante todo su ciclo, pues las necesidades hídricas y los procesos fisiológicos cambian desde la germinación hasta el llenado del grano. Hinojosa et al. (2018) demostraron que la fenología de la quinua posee cierta flexibilidad frente al estrés hídrico, lo que permite que algunos materiales ajusten la duración de sus etapas de desarrollo.

El déficit durante la germinación y el establecimiento puede disminuir la emergencia y reducir la densidad final de plantas. En esta fase, el sistema radicular se encuentra poco desarrollado y posee una capacidad limitada para acceder al agua almacenada en las capas profundas del suelo. Una pérdida temprana de plantas puede comprometer el rendimiento, incluso cuando las precipitaciones se restablecen posteriormente. Por ello, la rapidez y uniformidad del establecimiento constituyen características importantes para ambientes propensos a sequías iniciales.

Durante el crecimiento vegetativo, la disponibilidad limitada de agua reduce la expansión foliar y la acumulación de biomasa. Hinojosa et al. (2018) observaron cambios en el intercambio gaseoso y en las relaciones hídricas de la quinua durante el secado progresivo del suelo. Aunque determinados materiales pueden recuperar parcialmente su crecimiento después del riego, la intensidad y duración del déficit condicionan la posibilidad de compensar las pérdidas acumuladas durante esta etapa.

La fase reproductiva presenta una sensibilidad particular porque comprende la formación de la panoja, floración, fecundación y establecimiento de los granos. Un déficit durante la floración puede disminuir la cantidad de semillas, mientras que la sequía durante el llenado puede reducir su peso. Los modelos elaborados por Al-Naggar et al. (2017) muestran que las variaciones en la disponibilidad de agua influyen directamente en las brechas de rendimiento. Esta evidencia confirma la importancia de proteger las etapas reproductivas cuando se dispone de posibilidades de riego complementario.

Las variedades precoces pueden evitar la coincidencia entre sus fases más sensibles y los periodos de mayor escasez de agua. Esta estrategia representa un mecanismo de escape y no necesariamente una tolerancia fisiológica. En cambio, los cultivares de ciclo más prolongado necesitan conservar su funcionamiento durante un periodo mayor de exposición al estrés. La diferenciación entre escape y tolerancia resulta importante para interpretar correctamente las respuestas de los materiales y determinar su adaptación a cada ambiente.

Los resultados indican que los experimentos deben informar con precisión la etapa en la que se aplica el déficit, su duración y la disponibilidad de agua antes y después del tratamiento. Sin estos datos, la comparación entre investigaciones puede conducir a interpretaciones equivocadas. La identificación de las fases críticas también proporciona información para programar el riego y seleccionar variedades cuyo ciclo se ajuste a la distribución estacional de las precipitaciones.

### **Recuperación de las variedades después de periodos de sequía**

La capacidad de recuperación después de un periodo de sequía constituye una característica relevante, aunque menos estudiada que la respuesta durante el estrés. En los sistemas agrícolas reales, la disponibilidad hídrica puede fluctuar y las plantas pueden atravesar periodos secos seguidos por lluvias o riego. La capacidad para restablecer el intercambio gaseoso, el crecimiento y el desarrollo reproductivo puede determinar si el cultivo conserva un rendimiento aceptable después de la perturbación.

Las variedades presentan diferencias en la velocidad y magnitud de su recuperación. Al-Naggar et al. (2017) analizaron la sensibilidad de dos variedades frente a una sequía progresiva y mostraron que los materiales pueden seguir trayectorias fisiológicas diferentes durante el estrés. Estas diferencias pueden prolongarse después de la rehidratación, pues una variedad con menor daño celular podría recuperar rápidamente la actividad, mientras que otra puede mantener limitaciones aun cuando vuelve a disponer de agua.

La intensidad y duración del déficit condicionan la posibilidad de recuperación. Los periodos moderados pueden provocar respuestas reversibles, como el cierre estomático y la reducción temporal del crecimiento. En cambio, una

sequía severa o prolongada puede generar daños en las membranas, pérdida de hojas o afectación de los tejidos reproductivos. La protección antioxidante examinada por Hinojosa et al. (2018) podría contribuir a disminuir estos daños y facilitar el restablecimiento de las funciones fisiológicas.

El sistema radicular también influye en el aprovechamiento del agua disponible después de la sequía. Un sistema activo y bien distribuido permite absorber rápidamente la humedad procedente de nuevas precipitaciones o del riego. Sin embargo, cuando el estrés ocasiona deterioro radicular o una pérdida considerable de biomasa aérea, la recuperación puede ser incompleta. Por ello, la evaluación debería incorporar mediciones realizadas antes, durante y después del periodo de restricción.

Los estudios centrados únicamente en los efectos registrados durante la sequía proporcionan información limitada sobre la resiliencia del cultivo. Una variedad puede experimentar una reducción intensa de la actividad y posteriormente recuperarse, mientras que otra puede mantener inicialmente un comportamiento estable y presentar daños acumulativos. Los resultados muestran la necesidad de incorporar indicadores de recuperación fisiológica, crecimiento compensatorio y rendimiento final en las futuras evaluaciones.

### **Relaciones entre características agronómicas y fisiológicas**

La integración de las variables agronómicas y fisiológicas permite comprender con mayor precisión las diferencias observadas entre cultivares. Las características agronómicas muestran los efectos acumulados del estrés sobre la altura, biomasa, panoja y rendimiento, mientras que las mediciones fisiológicas explican los procesos que originan esas respuestas. Gámez Guzmán (2018) relacionó la caracterización fisiológica con el rendimiento de variedades sometidas a déficit hídrico, demostrando la utilidad de combinar ambos grupos de indicadores.

Las relaciones entre las variables no siempre son lineales. Un mayor crecimiento radicular puede mejorar la absorción de agua, pero también representa una inversión de recursos que podría limitar el desarrollo de la parte aérea. Del mismo modo, la regulación estomática reduce la transpiración, aunque un cierre excesivo puede disminuir la fotosíntesis. Hinojosa et al. (2018) demostraron la importancia de las señales radiculares en el control de los estomas, evidenciando la conexión existente entre el sistema radicular y la actividad fisiológica de la parte aérea.

La eficiencia hídrica puede influir positivamente sobre el rendimiento cuando permite conservar agua sin disminuir excesivamente la asimilación de carbono. Hinojosa et al. (2018) encontraron diferencias genotípicas en el intercambio gaseoso y en los isótopos estables de carbono y nitrógeno. Estos indicadores pueden ayudar a identificar materiales que mantienen una relación favorable entre consumo de agua y producción, aunque sus resultados necesitan comprobarse mediante variables agronómicas finales.

La producción de biomasa también debe relacionarse con el índice de cosecha. Una variedad puede conservar el crecimiento vegetativo durante el estrés y, al mismo tiempo, presentar una baja formación de granos. En cambio, un material de menor tamaño podría distribuir una proporción mayor de sus recursos hacia la producción. Esta relación confirma que la selección basada exclusivamente en una variable puede conducir a la identificación de materiales con respuestas parciales, pero sin una adaptación productiva completa.

Los análisis de correlación permiten reconocer asociaciones iniciales entre variables, mientras que los métodos multivariados facilitan la evaluación simultánea de numerosos caracteres. Estas herramientas pueden ayudar a identificar grupos de variedades y conjuntos de indicadores relacionados con la tolerancia. Sin embargo, las asociaciones estadísticas deben interpretarse considerando las condiciones experimentales y no como relaciones causales automáticas.

Los resultados respaldan el desarrollo de criterios integrales de selección que combinen rendimiento, estabilidad, eficiencia hídrica y mecanismos fisiológicos. Hinojosa et al. (2018) sostienen que la respuesta de la quinua a factores abióticos comprende diversos procesos interdependientes. La consideración conjunta de estos mecanismos puede mejorar la identificación de variedades capaces de conservar la productividad y no únicamente de sobrevivir bajo sequía.

### **Interacción entre genotipo y ambiente en la evaluación agronómica**

La interacción entre genotipo y ambiente constituye uno de los principales desafíos para seleccionar variedades de quinua adaptadas a la sequía. Un mismo material puede presentar rendimientos diferentes cuando cambian la altitud, temperatura, suelo, radiación o distribución de las precipitaciones. Bazile et al. (2016) señalan que la expansión mundial del cultivo ha evidenciado tanto su capacidad de adaptación como los límites que determinados materiales presentan al ser introducidos en nuevos ambientes.

Las evaluaciones realizadas en una sola localidad proporcionan información útil sobre la respuesta dentro de ese ambiente, pero no permiten determinar si el comportamiento se mantendrá en otras condiciones. Los ensayos multiterritoriales facilitan la comparación entre genotipos y permiten diferenciar materiales con adaptación amplia de aquellos que responden favorablemente en ambientes específicos. Esta distinción resulta importante para recomendar variedades según las características de cada región.

La variabilidad temporal también influye sobre la respuesta productiva. Los ciclos agrícolas pueden presentar diferencias en el inicio de las lluvias, duración de los periodos secos y ocurrencia de temperaturas extremas. Al-Naggar et al. (2017) mostraron que las brechas de rendimiento de la quinua cambian según la disponibilidad hídrica. En consecuencia, los ensayos desarrollados durante un único ciclo pueden no representar toda la variabilidad a la que estarán expuestos los cultivares.

Las características del suelo modifican igualmente la intensidad del déficit. Un suelo profundo y con buena capacidad de retención puede mantener agua disponible durante más tiempo, mientras que un suelo superficial o degradado intensifica rápidamente el estrés. Por ello, los estudios deben describir las condiciones edáficas y relacionarlas con los tratamientos aplicados. La omisión de esta información dificulta determinar si las diferencias observadas corresponden al genotipo, al ambiente o a su interacción.

Los análisis de estabilidad permiten identificar variedades con respuestas consistentes y materiales específicamente adaptados. Las primeras pueden utilizarse en regiones amplias donde las condiciones varían entre ciclos, mientras que las segundas pueden alcanzar rendimientos superiores en ambientes definidos. Ambas estrategias poseen valor para el mejoramiento y la producción, siempre que las recomendaciones se fundamenten en evaluaciones repetidas.

Los resultados muestran la necesidad de fortalecer los ensayos realizados en varias localidades y durante diferentes ciclos agrícolas. La diversidad genética descrita por Hinojosa et al. (2018) ofrece amplias posibilidades para seleccionar materiales adaptados, pero este potencial solo puede aprovecharse mediante evaluaciones que representen la heterogeneidad ambiental de las regiones productoras.

### **Mejoramiento genético de la quinua para ambientes afectados por sequía**

El mejoramiento genético constituye una estrategia fundamental para desarrollar variedades de quinua capaces de mantener su productividad en ambientes afectados por sequía. La amplia diversidad de la especie proporciona materiales con características morfológicas, fisiológicas y fenológicas que pueden aprovecharse en los procesos de selección. Murphy et al. (2018) destacan que el mejoramiento de la quinua posee un potencial considerable debido a la variabilidad existente entre sus grupos genéticos, aunque requiere definir criterios de selección adaptados a las condiciones de cada región productora.

La selección tradicional ha contribuido históricamente a conservar y desarrollar cultivares adaptados a condiciones particulares de altitud, temperatura y disponibilidad de agua. Las evaluaciones agronómicas permiten identificar materiales que mantienen características favorables de crecimiento y rendimiento durante el déficit hídrico. Al-Naggar et al. (2017) demostró la utilidad de comparar diferentes cultivares tolerantes mediante variables relacionadas con su comportamiento productivo. Sin embargo, la selección basada únicamente en características visibles puede resultar insuficiente para explicar los mecanismos responsables de la tolerancia.

La incorporación de indicadores fisiológicos permite reconocer respuestas que aparecen antes de que el estrés produzca efectos agronómicos evidentes. Hinojosa et al. (2018) identificaron variaciones entre cultivares en parámetros de intercambio gaseoso, mientras que Hinojosa et al. (2018) observaron diferencias en la capacidad

antioxidante bajo sequía. Estas características pueden fortalecer los procesos de selección cuando se relacionan con el rendimiento y la estabilidad productiva, aunque su medición requiere procedimientos y equipos especializados.

Las herramientas genómicas amplían las posibilidades de identificar regiones relacionadas con tolerancia, fenología, calidad y productividad. La secuenciación del genoma de la quinua desarrollada por Jarvis et al. (2017) proporcionó una base relevante para estudiar la organización genética de la especie y sus características adaptativas. A partir de estos avances, los marcadores moleculares pueden complementar las evaluaciones agronómicas y facilitar el seguimiento de rasgos de interés dentro de los programas de cruzamiento.

La selección debe considerar múltiples objetivos y evitar concentrarse exclusivamente en el rendimiento máximo. Murphy et al. (2018) señalan que el mejoramiento de la quinua requiere integrar productividad, estabilidad, calidad, adaptación y características relacionadas con el manejo. Una variedad tolerante a la sequía también debe presentar un ciclo adecuado, uniformidad, calidad de grano y características compatibles con los sistemas de cosecha y comercialización.

Los resultados muestran que la integración entre agronomía, fisiología y genética ofrece mayores posibilidades para identificar materiales adaptados. No obstante, las herramientas moleculares no reemplazan las evaluaciones de campo, pues los nuevos cultivares deben demostrar su desempeño bajo ambientes productivos reales. Los ensayos participativos también pueden fortalecer estos procesos al incorporar las preferencias de los agricultores y las condiciones específicas de cada territorio.

### **Importancia de las variedades locales para la adaptación climática**

Las variedades locales constituyen una fuente fundamental de diversidad para la adaptación de la quinua a condiciones climáticas variables. Estos materiales han sido seleccionados y conservados durante generaciones por comunidades agrícolas establecidas en ambientes con diferencias de altitud, temperatura, precipitación y suelo. Hinojosa et al. (2018) destacan que la biodiversidad de la quinua representa un recurso estratégico para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad frente al cambio climático.

La selección realizada por los agricultores ha favorecido la conservación de características relacionadas con precocidad, tolerancia a temperaturas bajas, respuesta frente a la disponibilidad irregular de agua y adaptación a suelos específicos. Hinojosa et al. (2018) explican que la resistencia de la quinua a factores abióticos se relaciona con la diversidad desarrollada en los ambientes andinos. Por consiguiente, los materiales locales pueden aportar genes y rasgos que no se encuentran presentes en variedades mejoradas seleccionadas principalmente por rendimiento.

La caracterización agronómica permite identificar cuáles variedades conservan características útiles para ambientes afectados por sequía. La altura, duración del ciclo, arquitectura de la panoja, desarrollo radicular, biomasa y rendimiento constituyen variables necesarias para describir su comportamiento. Sin embargo, estos materiales también pueden presentar limitaciones relacionadas con uniformidad, tamaño del grano, contenido de saponinas o facilidad de cosecha. Los programas de mejoramiento deben aprovechar sus ventajas adaptativas y, al mismo tiempo, corregir las características que restringen su utilización comercial.

La conservación de estos recursos puede desarrollarse mediante bancos de germoplasma y dentro de los propios sistemas agrícolas. La conservación ex situ protege los materiales frente a su posible desaparición, mientras que el mantenimiento en las fincas permite que continúen evolucionando bajo las condiciones ambientales y las prácticas culturales locales. La expansión global descrita por Bazile et al. (2016) aumenta la importancia de proteger la diversidad andina que constituye la base genética del cultivo.

La utilización de variedades locales en programas de mejoramiento también requiere la participación y el reconocimiento de las comunidades que han contribuido a su conservación. Los productores pueden proporcionar información sobre el comportamiento de los materiales, sus usos y sus ventajas dentro de sistemas productivos específicos. Esta colaboración mejora la pertinencia de los objetivos de selección y contribuye a evitar que la adaptación se evalúe únicamente mediante criterios experimentales alejados de la realidad territorial.

Los resultados confirman que la adaptación climática de la quinua depende, en buena medida, del aprovechamiento responsable de su diversidad genética. La pérdida de variedades locales reduciría las posibilidades de desarrollar materiales capaces de responder a condiciones ambientales futuras. Por ello, la caracterización, conservación y utilización sostenible del germoplasma deben considerarse componentes complementarios de las estrategias de mejoramiento.

### **Limitaciones metodológicas de los estudios analizados**

La evidencia revisada presenta una elevada heterogeneidad relacionada con los cultivares, condiciones experimentales, niveles de déficit hídrico e indicadores de respuesta. Algunos estudios comparan numerosos materiales mediante variables agronómicas, como la evaluación desarrollada por Al-Naggar et al. (2017), mientras que otros examinan pocas variedades con un mayor nivel de detalle fisiológico. Esta diversidad amplía el conocimiento disponible, pero dificulta la comparación directa y la identificación de respuestas consistentes.

Los tratamientos utilizados para generar el estrés hídrico varían considerablemente. Determinadas investigaciones suspenden completamente el riego, otras reducen progresivamente la disponibilidad de agua y algunas comparan varios niveles de déficit. Al-Naggar et al. (2017) aplicaron una sequía progresiva para analizar la sensibilidad varietal, mientras que Al-Naggar et al. (2017) diferenciaron condiciones moderadas y severas. Cuando los estudios no describen claramente la humedad del suelo, duración del tratamiento o etapa fenológica, resulta difícil determinar si las respuestas fueron ocasionadas por niveles equivalentes de estrés.

La diversidad de indicadores constituye otra limitación. Las evaluaciones agronómicas suelen incluir altura, panoja, biomasa y rendimiento, mientras que los estudios fisiológicos incorporan conductancia estomática, fotosíntesis, potencial hídrico o actividad antioxidante. Hinojosa et al. (2018) emplearon parámetros de intercambio gaseoso e isótopos estables para examinar diferencias genotípicas, pero estas variables no aparecen en la mayoría de los estudios agronómicos. La ausencia de un conjunto básico de indicadores reduce la comparabilidad entre investigaciones.

Las condiciones de invernadero y campo también generan diferencias metodológicas. Los experimentos controlados permiten aplicar tratamientos precisos, pero pueden limitar el crecimiento radicular y no reproducen completamente la interacción entre clima, suelo y manejo. Las evaluaciones de campo presentan una mayor validez productiva, aunque poseen menor control sobre la distribución del agua y otras variables ambientales. La comparación de resultados debe considerar estas diferencias y evitar asumir que las respuestas obtenidas en ambos ambientes son directamente equivalentes.

La duración de los estudios representa una limitación adicional. Numerosas evaluaciones se desarrollan durante un solo ciclo agrícola, por lo que no permiten determinar la estabilidad de los materiales frente a las variaciones climáticas interanuales. Al-Naggar et al. (2017) demostraron que la disponibilidad de agua modifica las brechas de rendimiento, lo que evidencia la importancia de repetir los ensayos bajo diferentes condiciones. También resultan escasas las evaluaciones realizadas simultáneamente en varias localidades.

Los resultados muestran que la calidad de futuras investigaciones podría fortalecerse mediante una descripción precisa de los tratamientos, condiciones del suelo, materiales genéticos y etapas fenológicas. La utilización de protocolos comparables y conjuntos básicos de variables facilitaría la síntesis de la evidencia y permitiría diferenciar con mayor claridad la tolerancia genética de las respuestas condicionadas por el ambiente.

### **Vacíos de conocimiento identificados en la literatura**

Uno de los principales vacíos identificados corresponde a la escasez de evaluaciones desarrolladas durante varios ciclos agrícolas. Los estudios de corta duración permiten conocer la respuesta de los materiales bajo condiciones específicas, pero no determinan si su rendimiento se mantiene cuando cambia la distribución de las precipitaciones. La relación entre disponibilidad hídrica y brechas de producción mostrada por Al-Naggar et al. (2017) evidencia la necesidad de incorporar una mayor variabilidad temporal.

También se identificó una disponibilidad limitada de ensayos multiterritoriales. Una variedad puede comportarse favorablemente en una localidad y presentar resultados diferentes cuando cambian el suelo, la temperatura o la altitud. La expansión internacional de la quinua analizada por Bazile et al. (2016) confirma que la adaptación posee límites asociados con las características de cada ambiente. Por ello, se requieren estudios que permitan diferenciar materiales con adaptación amplia de aquellos apropiados para territorios específicos.

La integración entre indicadores agronómicos y fisiológicos continúa siendo insuficiente. Algunos trabajos se concentran en el rendimiento y sus componentes, mientras que otros analizan procesos fisiológicos sin relacionarlos suficientemente con la producción final. Hinojosa et al. (2018) muestran que la respuesta de la quinua frente a factores abióticos comprende mecanismos interdependientes. La selección de materiales tolerantes requiere, por tanto, conectar esas respuestas con su utilidad agronómica.

El sistema radicular constituye otra área con información limitada debido a las dificultades para medirlo, especialmente en condiciones de campo. Aunque se reconoce su importancia en la absorción de agua y la regulación fisiológica, son escasos los estudios que comparan sistemáticamente profundidad, arquitectura y biomasa radicular entre variedades. La incorporación de métodos de imagen y técnicas no destructivas podría mejorar la caracterización de este componente.

La recuperación posterior al estrés también ha recibido menor atención. Los periodos de sequía pueden ser temporales y estar seguidos por precipitaciones o riego, de modo que la capacidad para restablecer el crecimiento y la actividad fisiológica puede influir en el rendimiento. Los estudios deberían incluir mediciones posteriores a la rehidratación para diferenciar materiales con daños persistentes de aquellos capaces de recuperar su funcionamiento.

Otro vacío se relaciona con la falta de procedimientos estandarizados para definir la intensidad del estrés. Las diferencias en humedad del suelo, duración del déficit y etapa fenológica dificultan la comparación entre estudios. Asimismo, se requiere avanzar hacia índices integrales que relacionen productividad, estabilidad, eficiencia hídrica y respuestas fisiológicas, evitando que la tolerancia se determine mediante una única variable.

Finalmente, la participación de los productores y la incorporación de sus prioridades aparecen de manera limitada en la literatura. Las evaluaciones agronómicas necesitan considerar características como ciclo, facilidad de cosecha, calidad del grano y aceptación comercial. La investigación participativa puede ayudar a seleccionar materiales que, además de tolerar la sequía, respondan a las condiciones reales de manejo y a las necesidades de las comunidades productoras.

### **Perspectivas futuras para la evaluación de quinua tolerante a sequía**

Las investigaciones futuras deberán avanzar hacia evaluaciones integrales que combinen agronomía, fisiología y genética. Las variables de crecimiento y rendimiento continuarán siendo fundamentales para determinar la utilidad productiva de los cultivares, pero su interpretación puede fortalecerse mediante indicadores relacionados con estado hídrico, intercambio gaseoso, protección antioxidante y desarrollo radicular. Murphy et al. (2018) destacan que el mejoramiento de la quinua requiere integrar diferentes herramientas para responder a objetivos productivos y ambientales.

El fenotipado de alta precisión ofrece posibilidades para registrar de manera continua los cambios producidos por la sequía. Las imágenes digitales, sensores y mediciones automatizadas pueden facilitar el seguimiento del crecimiento, temperatura foliar y estado hídrico de las plantas. Estas herramientas permitirían detectar respuestas tempranas y evaluar un mayor número de materiales, aunque sus resultados deberán validarse mediante variables agronómicas y productivas convencionales.

El análisis del sistema radicular constituye otra prioridad. Las nuevas técnicas de imagen y evaluación no destructiva pueden mejorar la caracterización de la arquitectura de las raíces y su respuesta a la distribución de agua en el suelo. Esta información podría relacionarse con la regulación estomática estudiada por Hinojosa et al. (2018), permitiendo comprender con mayor precisión la comunicación entre el sistema radicular y la parte aérea durante la sequía.

La integración de información fenotípica y genómica puede acelerar la identificación de materiales tolerantes. El genoma de referencia desarrollado por Jarvis et al. (2017) proporciona una base para localizar regiones asociadas con características adaptativas. Los marcadores moleculares y otras herramientas genómicas pueden facilitar la selección, pero deben utilizarse junto con evaluaciones de campo que demuestren la expresión de los rasgos en ambientes productivos.

Los ensayos futuros deberían desarrollarse durante varios ciclos y en localidades representativas de las zonas productoras. Esta estrategia permitiría estimar la interacción entre genotipo y ambiente, analizar la estabilidad del rendimiento y formular recomendaciones territoriales. También será necesario describir con precisión las condiciones del suelo, intensidad del déficit, duración del tratamiento y etapa fenológica para facilitar la comparación entre investigaciones.

Los procesos participativos pueden mejorar la pertinencia de los programas de evaluación y mejoramiento. Los agricultores poseen conocimientos sobre el comportamiento de las variedades, la distribución de las lluvias y las características necesarias para el manejo y comercialización. La combinación de estos conocimientos con las evaluaciones científicas puede contribuir al desarrollo de materiales que respondan tanto a la sequía como a las necesidades productivas locales.

En conjunto, los resultados muestran que la quinua posee una diversidad considerable para afrontar ambientes con disponibilidad limitada de agua. Hinojosa et al. (2018) destacan el valor de esta biodiversidad para la sostenibilidad y la seguridad alimentaria bajo cambio climático. El aprovechamiento de este potencial dependerá de la capacidad para desarrollar evaluaciones comparables, multiterritoriales, participativas y de largo plazo que integren mecanismos fisiológicos con estabilidad productiva.

#### 4. DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión de alcance muestran que la evaluación agronómica de variedades mejoradas de quinua adaptadas a la sequía constituye un campo caracterizado por una elevada diversidad de materiales, tratamientos e indicadores. Esta heterogeneidad responde a la complejidad de la tolerancia al déficit hídrico, la cual no puede determinarse mediante una sola característica. Al-Naggar et al. (2017) demostró la utilidad de comparar múltiples variables agronómicas entre cultivares, mientras que Gámez Guzmán (2018) integró el rendimiento con indicadores fisiológicos. En conjunto, ambos enfoques evidencian que la adaptación productiva depende de las interacciones entre crecimiento, estado hídrico, mecanismos de protección y capacidad para formar grano.

La variabilidad genética identificada constituye una de las principales fortalezas para el mejoramiento de la quinua. Los materiales procedentes de ambientes contrastantes presentan diferencias relacionadas con duración del ciclo, arquitectura, crecimiento radicular y respuesta fisiológica. Hinojosa et al. (2018) sostienen que la biodiversidad de la especie representa un recurso estratégico para la seguridad alimentaria y la adaptación climática. Sin embargo, la existencia de diversidad no garantiza por sí misma la identificación de variedades tolerantes, pues los rasgos favorables deben expresarse de manera estable bajo condiciones productivas representativas.

La expansión de la quinua hacia regiones diferentes de su centro de origen confirma su plasticidad, pero también demuestra que la adaptación de los materiales posee límites. Bazile et al. (2016) advierten que el comportamiento del cultivo puede verse condicionado por el fotoperiodo, la temperatura y las particularidades de cada ambiente. Por ello, la procedencia geográfica debe utilizarse como una orientación inicial y no como una garantía de tolerancia. La evaluación comparativa bajo condiciones comunes resulta indispensable para diferenciar los efectos genéticos de aquellos generados por el ambiente.

La altura y el crecimiento continúan siendo indicadores ampliamente empleados debido a su facilidad de medición. No obstante, los resultados muestran que una mayor altura no equivale necesariamente a una mejor adaptación. Al-Naggar et al. (2017) encontraron respuestas contrastantes entre genotipos sometidos a niveles moderados y severos de sequía. Algunos materiales pueden conservar su crecimiento, mientras que otros reducen la expansión vegetativa para disminuir la demanda hídrica. Esta última respuesta podría representar un ajuste funcional siempre que permita mantener la formación de grano.

La interpretación del crecimiento requiere considerar la distribución de los recursos dentro de la planta. Una variedad puede producir una elevada cantidad de biomasa sin destinar una proporción suficiente hacia las estructuras reproductivas. En este sentido, el índice de cosecha complementa las mediciones de altura y materia seca al mostrar la eficiencia con la que la biomasa se convierte en rendimiento. La evaluación conjunta de estas variables permite distinguir entre materiales vigorosos y cultivares verdaderamente eficientes bajo sequía.

Las características de la panoja también deben interpretarse dentro de un enfoque integrado. Su longitud y diámetro pueden relacionarse con el potencial productivo, pero una estructura de gran tamaño no garantiza un mayor número o peso de granos. Hinojosa et al. (2018) demostraron que la respuesta de la quinua frente a la disponibilidad de agua depende de la etapa fenológica afectada. Una panoja desarrollada antes del estrés puede experimentar dificultades durante la floración o el llenado, reduciendo el rendimiento final a pesar de conservar dimensiones favorables.

La etapa fenológica constituye, por tanto, un elemento determinante para comparar los estudios. El déficit durante la germinación puede comprometer el establecimiento, mientras que la sequía en la fase vegetativa reduce la expansión foliar y la biomasa. Cuando el estrés ocurre durante la floración o el llenado del grano, sus efectos se trasladan directamente al rendimiento. Los modelos elaborados por Al-Naggar et al. (2017) confirman que la disponibilidad de agua influye en las brechas productivas de la quinua. En consecuencia, la expresión “condiciones de sequía” resulta insuficiente cuando no se informa la intensidad, duración y momento de aplicación del tratamiento.

La heterogeneidad en la definición del estrés constituye una de las principales limitaciones metodológicas de la literatura. Algunos estudios suspenden completamente el riego, otros reducen gradualmente el agua y algunos comparan varios niveles de disponibilidad. Al-Naggar et al. (2017) analizaron una sequía progresiva, lo que permitió observar la evolución de las respuestas varietales. Sin embargo, estos resultados no pueden compararse directamente con experimentos que aplican una restricción abrupta o durante otra etapa del ciclo. La utilización de criterios comunes para describir humedad del suelo, duración y severidad mejoraría considerablemente la comparabilidad.

La producción y distribución de biomasa ofrecen información relevante sobre las estrategias adoptadas por los cultivares. Bajo sequía, algunos materiales incrementan proporcionalmente la inversión en raíces para explorar un mayor volumen de suelo, mientras que otros conservan el crecimiento aéreo y la actividad fotosintética. Hinojosa et al. (2018) explican que las respuestas de la quinua frente a factores abióticos comprenden ajustes coordinados en crecimiento, fisiología y metabolismo. Por esta razón, una mayor biomasa radicular debe interpretarse considerando sus efectos sobre la parte aérea y la producción de grano.

El sistema radicular posee una importancia evidente, pero continúa siendo uno de los componentes menos estudiados. Las evaluaciones destructivas permiten estimar la biomasa, aunque proporcionan una representación puntual y pueden perder raíces finas durante la extracción. Además, los recipientes utilizados en invernadero restringen el crecimiento y pueden modificar la arquitectura radicular. Estas limitaciones muestran la necesidad de desarrollar procedimientos accesibles que permitan estudiar profundidad, distribución y plasticidad en condiciones de campo.

El comportamiento hídrico evidencia que los cultivares emplean estrategias fisiológicas contrastantes. La regulación estomática permite reducir la transpiración, pero también limita la entrada de dióxido de carbono y puede disminuir la fotosíntesis. Hinojosa et al. (2018) demostraron que las señales procedentes de las raíces intervienen en el control estomático de la quinua durante la sequía. La tolerancia no depende, por tanto, del cierre máximo de los estomas, sino de la capacidad para conservar agua sin comprometer excesivamente la producción de fotoasimilados.

Las diferencias genotípicas en el intercambio gaseoso respaldan esta interpretación. Hinojosa et al. (2018) encontraron variaciones entre cultivares en parámetros relacionados con fotosíntesis, transpiración y eficiencia hídrica. Algunos materiales pueden mantener la actividad durante más tiempo, mientras que otros adoptan una estrategia conservadora y reducen rápidamente el consumo de agua. La ventaja de cada respuesta dependerá de la duración del déficit y de la posibilidad de recibir precipitaciones o riego antes de que se produzcan daños irreversibles.

La eficiencia en el uso del agua aparece como un criterio importante, pero su definición varía entre investigaciones. Puede calcularse relacionando el agua consumida con la biomasa, el rendimiento de grano o el intercambio gaseoso instantáneo. Esta diversidad conceptual dificulta la comparación de los valores comunicados. Una variedad que

consume poca agua no debe considerarse eficiente si su rendimiento también es reducido. El criterio agrónomicamente relevante consiste en mantener una relación favorable entre el recurso utilizado y la producción obtenida.

Los mecanismos antioxidantes aportan otra dimensión para comprender las diferencias entre variedades. La sequía puede incrementar la formación de especies reactivas de oxígeno y generar daños celulares. Hinojosa et al. (2018) observaron modificaciones en la capacidad antioxidante de la quinua sometida a déficit hídrico. Los materiales con mejores sistemas de protección podrían conservar la estabilidad de las membranas y recuperar con mayor rapidez su funcionamiento, aunque esta respuesta debe relacionarse con el rendimiento para determinar su utilidad dentro del mejoramiento.

El rendimiento continúa siendo el criterio definitivo para determinar la utilidad productiva de un material tolerante. Sin embargo, los resultados indican que la selección basada exclusivamente en el valor máximo puede favorecer genotipos vulnerables. Una variedad puede alcanzar una producción elevada con suficiente agua y experimentar pérdidas pronunciadas bajo sequía, mientras que otra puede presentar un potencial moderado y conservar una producción más estable. Al-Naggar et al. (2017) evidenciaron diferencias entre genotipos sometidos a niveles contrastantes de estrés, confirmando la necesidad de analizar simultáneamente productividad y reducción relativa del rendimiento.

La estabilidad posee especial importancia en las regiones donde las precipitaciones cambian entre ciclos. Los agricultores necesitan variedades capaces de ofrecer rendimientos predecibles y no únicamente materiales destacados durante temporadas favorables. No obstante, una reducción porcentual pequeña tampoco garantiza una buena alternativa si el rendimiento inicial es demasiado bajo. Los índices de tolerancia deben acompañarse de los valores absolutos de producción para evitar interpretaciones equivocadas y seleccionar materiales que combinen estabilidad con un nivel productivo adecuado.

La comparación entre variedades costeras y del altiplano muestra que la adaptación puede lograrse mediante estrategias diferentes. Los materiales precoces pueden completar las etapas sensibles antes de los periodos de mayor déficit, lo que constituye un mecanismo de escape. En cambio, otros cultivares mantienen su funcionamiento durante periodos más prolongados gracias a mecanismos fisiológicos. Hinojosa et al. (2018) describen la resistencia de la quinua frente a diversos factores abióticos, pero esta capacidad presenta diferencias entre materiales. La combinación de precocidad y tolerancia fisiológica podría representar un objetivo útil para los programas de mejoramiento.

La precocidad también presenta posibles limitaciones. Un ciclo excesivamente corto puede reducir el tiempo disponible para acumular biomasa y restringir el rendimiento potencial. Por el contrario, los cultivares tardíos pueden aprovechar periodos prolongados de disponibilidad hídrica, pero quedar expuestos a sequías terminales. El equilibrio óptimo dependerá de la distribución estacional de las lluvias y de las características del sistema productivo. En consecuencia, no existe una duración del ciclo adecuada para todos los ambientes.

La adaptación a condiciones de secano tampoco depende exclusivamente de la genética. La profundidad, textura y capacidad de retención del suelo modifican la cantidad de agua disponible para las raíces. Las prácticas de cobertura, conservación de humedad y manejo de la fecha de siembra pueden reducir la exposición de los cultivos. Las variedades mejoradas deben integrarse con estrategias agronómicas apropiadas, pues incluso un material tolerante puede experimentar pérdidas importantes cuando el suelo se encuentra degradado o el manejo no corresponde a las condiciones locales.

La capacidad de recuperación después del estrés constituye uno de los vacíos más relevantes. Las sequías agrícolas pueden ser intermitentes y estar seguidas por precipitaciones o riego. Al-Naggar et al. (2017) demostraron que las variedades presentan distinta sensibilidad durante la progresión del déficit, pero la evidencia disponible todavía resulta limitada respecto al restablecimiento posterior de la actividad fisiológica y el crecimiento. Incorporar periodos de rehidratación permitiría diferenciar los materiales con daños persistentes de aquellos capaces de recuperar sus funciones.

La interacción entre genotipo y ambiente representa otro desafío central. Los cultivares pueden cambiar su comportamiento cuando varían la altitud, temperatura, suelo y disponibilidad de agua. La evaluación en una sola localidad y durante un único ciclo no permite determinar la estabilidad. Los ensayos multiterritoriales y plurianuales resultan necesarios para identificar variedades con adaptación amplia y materiales apropiados para condiciones específicas.

Las variedades locales desempeñan una función importante dentro de esta estrategia porque conservan características desarrolladas mediante largos procesos de selección. Hinojosa et al. (2018) resaltan el valor de la biodiversidad de la quinua para responder al cambio climático. Su conservación no debería limitarse a los bancos de germoplasma, sino incluir su mantenimiento dentro de los sistemas productivos. La participación de los agricultores puede contribuir a identificar rasgos relacionados con manejo, calidad y estabilidad que no siempre reciben suficiente atención en los ensayos experimentales.

Los avances genómicos proporcionan nuevas posibilidades para aprovechar esta diversidad. La secuenciación realizada por Jarvis et al. (2017) estableció una base para estudiar regiones asociadas con domesticación, calidad y adaptación. Sin embargo, la identificación de genes o marcadores no reemplaza las evaluaciones agronómicas. Los rasgos seleccionados deben expresarse de manera estable bajo las condiciones ambientales y productivas para las cuales se desarrolla la variedad.

La integración de las evaluaciones agronómicas convencionales con herramientas fisiológicas, moleculares y de fenotipado puede mejorar la eficiencia de los procesos de selección. Murphy et al. (2018) señalan que el mejoramiento de la quinua requiere combinar la caracterización fenotípica con los avances genómicos para identificar materiales adaptados a distintos ambientes. En este proceso, las imágenes y los sensores pueden facilitar el seguimiento del crecimiento, la temperatura foliar y el estado hídrico de un mayor número de plantas. No obstante, la aplicación de estas tecnologías debe considerar los recursos técnicos y económicos disponibles en las instituciones productoras. Una estrategia escalonada podría utilizar indicadores agronómicos sencillos durante el cribado inicial y reservar las evaluaciones fisiológicas y moleculares para los materiales más prometedores. El genoma de referencia desarrollado por Jarvis et al. (2017) ofrece una base para relacionar posteriormente los rasgos observados con regiones genéticas potencialmente vinculadas con la adaptación.

Desde el punto de vista analítico, las correlaciones entre variables proporcionan información inicial sobre las relaciones entre los componentes de la tolerancia, pero no explican completamente la complejidad de estas respuestas. Al-Naggar et al. (2017) identificaron asociaciones entre la tolerancia a la sequía y diferentes características agronómicas, lo que evidencia la necesidad de analizar varios rasgos simultáneamente. Los métodos multivariados pueden contribuir a reconocer patrones conjuntos entre crecimiento, eficiencia hídrica, biomasa y rendimiento. Hinojosa et al. (2018) demostraron que los cultivares presentan diferencias simultáneas en distintos parámetros fisiológicos, por lo que la utilización de una sola variable podría generar interpretaciones parciales. Los criterios o índices obtenidos mediante estos análisis deben validarse en otros ambientes antes de incorporarse de manera definitiva a los programas de selección.

La revisión confirma que la estandarización metodológica debe equilibrarse con la adaptación territorial de las evaluaciones. Al-Naggar et al. (2017) aplicaron un esquema de sequía progresiva, mientras que Al-Naggar et al. (2017) diferenciaron niveles moderados y severos de estrés. Estas variaciones muestran que el concepto de sequía puede representar tratamientos considerablemente distintos entre investigaciones. La utilización de criterios comunes para informar la humedad del suelo, intensidad y duración del déficit y etapa fenológica facilitaría la comparación de los resultados. Sin embargo, las particularidades territoriales deben conservarse, debido a que la respuesta de la quinua también está condicionada por el clima, el suelo y el manejo. Al-Naggar et al. (2017) evidenciaron que la disponibilidad hídrica influye en las brechas de rendimiento bajo las condiciones específicas del altiplano boliviano, lo que demuestra la importancia de contextualizar los resultados.

Las redes de investigación entre universidades, centros de mejoramiento y organizaciones de productores podrían contribuir a superar las limitaciones identificadas. La evaluación coordinada de materiales comunes en diferentes

ambientes andinos permitiría analizar con mayor solidez la interacción entre genotipo y ambiente. Bazile et al. (2016) explican que la expansión de la quinua hacia nuevas regiones ha puesto de manifiesto tanto su potencial adaptativo como las limitaciones de determinados materiales fuera de sus ambientes de origen. Por ello, los ensayos coordinados podrían facilitar la identificación de variedades ampliamente adaptadas y de materiales apropiados para condiciones específicas. Desde la perspectiva del mejoramiento, Murphy et al. (2018) destacan la necesidad de integrar recursos genéticos, evaluaciones agronómicas y herramientas genómicas para responder a los diferentes objetivos productivos y ambientales.

En conjunto, la evidencia examinada confirma que la tolerancia de la quinua a la sequía es una característica multidimensional. No existe un único indicador capaz de garantizar adaptación, pues el rendimiento depende de la interacción entre desarrollo radicular, regulación hídrica, protección celular, fenología y asignación de biomasa. Hinojosa et al. (2018) coinciden en que la respuesta frente a factores abióticos surge de mecanismos interdependientes. Por ello, la selección debe integrar productividad, estabilidad y eficiencia hídrica con indicadores fisiológicos que ayuden a explicar las diferencias varietales.

La principal contribución de esta revisión consiste en organizar los enfoques e indicadores utilizados y mostrar sus relaciones con la selección de materiales tolerantes. La literatura proporciona conocimientos relevantes sobre el comportamiento agronómico y fisiológico de la quinua, pero persisten vacíos relacionados con el sistema radicular, recuperación posterior al estrés y validación multiterritorial. El aprovechamiento del potencial descrito por Murphy et al. (2018) requerirá combinar mejoramiento convencional, herramientas genómicas, evaluación agronómica y participación de los productores.

Finalmente, la adaptación climática de la quinua dependerá de la conservación de su diversidad y de la capacidad para convertirla en variedades productivas y estables. Los futuros programas deberán evaluar los materiales durante varios ciclos, bajo niveles de estrés claramente definidos y en ambientes representativos. La integración entre agronomía, fisiología y genética permitirá desarrollar variedades que no solo sobrevivan a la sequía, sino que mantengan rendimientos adecuados dentro de sistemas agrícolas progresivamente más variables.

## 5. CONCLUSIÓN

La presente revisión de alcance permitió mapear y analizar la evidencia disponible sobre la evaluación agronómica de variedades mejoradas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) adaptadas a condiciones de sequía. Los hallazgos confirman que la tolerancia al déficit hídrico constituye una característica multidimensional determinada por la interacción entre el genotipo, las condiciones ambientales, la etapa fenológica y la intensidad y duración del estrés. Por esta razón, la adaptación no puede establecerse mediante una sola variable, sino que requiere integrar indicadores morfológicos, fisiológicos y productivos.

En respuesta a la pregunta de investigación, se identificó que los indicadores utilizados con mayor frecuencia corresponden a la altura de la planta, características de la panoja, producción y distribución de biomasa, desarrollo radicular, estado hídrico, intercambio gaseoso, eficiencia en el uso del agua, rendimiento de grano, índice de cosecha y estabilidad productiva. Estas variables proporcionan información complementaria, pues las características agronómicas permiten determinar los efectos del déficit sobre el crecimiento y la producción, mientras que los indicadores fisiológicos contribuyen a explicar los mecanismos responsables de las diferencias entre variedades.

La diversidad genética de la quinua representa uno de los principales recursos para desarrollar cultivares tolerantes a la sequía. Los materiales procedentes de regiones costeras, valles y zonas del altiplano presentan características adaptativas relacionadas con la duración del ciclo, arquitectura de la planta, desarrollo radicular, regulación hídrica y estabilidad productiva. Sin embargo, la presencia de esta diversidad no garantiza automáticamente la identificación de variedades superiores. Los materiales necesitan evaluarse bajo condiciones comparables y en ambientes representativos para determinar la estabilidad de sus respuestas y su utilidad dentro de los sistemas productivos.

La altura, biomasa y características de la panoja constituyen indicadores útiles y accesibles para los programas de selección, pero deben interpretarse conjuntamente con el rendimiento. Una planta con mayor crecimiento vegetativo no necesariamente produce una cantidad superior de grano, del mismo modo que una panoja de gran tamaño puede

experimentar dificultades durante la floración o el llenado. El índice de cosecha permite complementar estas evaluaciones al mostrar la proporción de biomasa destinada a las estructuras productivas. En consecuencia, la selección debe valorar la eficiencia con la que los materiales transforman los recursos disponibles en rendimiento y no únicamente su vigor vegetativo.

El desarrollo radicular y la regulación fisiológica ocupan una posición central dentro de la adaptación. Los sistemas radiculares profundos o plásticos pueden mejorar el acceso al agua, pero su formación exige recursos que podrían limitar el crecimiento aéreo. La regulación estomática, el ajuste osmótico, la estabilidad de las membranas y la actividad antioxidante contribuyen a conservar la hidratación y reducir el daño celular. No obstante, estas respuestas solo poseen valor agronómico cuando permiten mantener o recuperar la producción. Por ello, las evaluaciones fisiológicas deben relacionarse con la biomasa, el índice de cosecha y el rendimiento final.

La eficiencia en el uso del agua constituye un criterio estratégico para seleccionar variedades destinadas a ambientes secos. Sin embargo, la diversidad de procedimientos utilizados para calcularla limita la comparación entre investigaciones. La reducción del consumo hídrico no representa necesariamente una ventaja cuando se acompaña de rendimientos insuficientes. El objetivo del mejoramiento debe ser identificar materiales capaces de mantener una relación favorable entre agua utilizada y producción obtenida, además de conservar dicha respuesta bajo diferentes condiciones ambientales.

El rendimiento de grano continúa siendo el principal indicador de utilidad productiva, pero debe evaluarse junto con su estabilidad. Una variedad puede alcanzar una producción elevada en condiciones favorables y experimentar pérdidas pronunciadas durante la sequía, mientras que otra puede presentar un rendimiento máximo moderado y conservar una mayor proporción bajo estrés. En ambientes expuestos a precipitaciones irregulares, la estabilidad puede resultar tan importante como el potencial productivo. Los programas de mejoramiento deben considerar el rendimiento absoluto, la reducción relativa y la consistencia del comportamiento entre ambientes y ciclos agrícolas.

La etapa fenológica en la que ocurre el déficit hídrico determina la magnitud de sus efectos. La sequía durante la germinación compromete el establecimiento, mientras que el estrés vegetativo reduce la expansión foliar y la acumulación de biomasa. La restricción durante la floración y el llenado afecta directamente el número y peso de los granos. Esta diferenciación resulta necesaria para diseñar tratamientos experimentales, comparar los resultados y establecer estrategias de manejo. También permite reconocer variedades precoces que escapen de los periodos secos y materiales capaces de tolerar fisiológicamente una exposición más prolongada.

La adaptación a condiciones de secano no depende exclusivamente de las características genéticas. La profundidad y capacidad de retención del suelo, distribución de las precipitaciones, fecha de siembra y prácticas de conservación de humedad modifican el nivel de estrés experimentado por el cultivo. En consecuencia, las variedades mejoradas deben integrarse con estrategias agronómicas ajustadas a cada territorio. Las evaluaciones efectuadas únicamente bajo condiciones óptimas o controladas no resultan suficientes para formular recomendaciones destinadas a los sistemas productivos reales.

Entre los principales vacíos de conocimiento se identificaron la limitada evaluación del sistema radicular, la escasez de estudios sobre recuperación después de la rehidratación y la insuficiente integración entre indicadores agronómicos y fisiológicos. También se encontraron diferencias considerables en la definición de la intensidad del estrés, duración de los tratamientos y etapas fenológicas evaluadas. Esta heterogeneidad metodológica dificulta la comparación directa y restringe la posibilidad de desarrollar síntesis cuantitativas.

La reducida disponibilidad de estudios multiterritoriales y plurianuales representa otra limitación relevante. Las evaluaciones desarrolladas durante un único ciclo o en una sola localidad no permiten determinar completamente la estabilidad ni la interacción entre genotipo y ambiente. Las futuras investigaciones deben ampliar las redes de experimentación, evaluar materiales comunes bajo diferentes condiciones y describir con precisión el suelo, la disponibilidad de agua y los tratamientos aplicados. Un conjunto básico de indicadores comparables facilitaría la integración de la evidencia sin desconocer las particularidades de cada territorio.

Las perspectivas futuras se orientan hacia la integración entre evaluación agronómica, fisiología, fenotipado y genética. Los sensores, imágenes y sistemas automatizados pueden mejorar el seguimiento del crecimiento y el estado hídrico, mientras que las herramientas genómicas pueden contribuir a identificar la base heredable de las características adaptativas. Sin embargo, estas tecnologías deben complementar y no sustituir las evaluaciones de campo. También resulta necesario mantener procedimientos accesibles que puedan utilizarse en instituciones con diferentes capacidades técnicas y económicas.

La conservación y caracterización de las variedades locales deberá ocupar una posición prioritaria dentro de los programas de adaptación climática. Estos materiales contienen características desarrolladas mediante procesos históricos de selección y constituyen una fuente relevante para el mejoramiento. Su utilización debe acompañarse de la participación de los productores, quienes pueden aportar información sobre estabilidad, facilidad de manejo, calidad del grano y aceptación comercial. Los enfoques participativos aumentan las posibilidades de desarrollar variedades científicamente sólidas y apropiadas para las necesidades locales.

En conclusión, la quinua presenta una diversidad genética y agronómica con un potencial considerable para responder a condiciones de sequía. El aprovechamiento de este recurso requiere evaluaciones integrales capaces de combinar rendimiento, estabilidad, eficiencia hídrica, desarrollo radicular y mecanismos fisiológicos. El fortalecimiento de los estudios multiterritoriales y de largo plazo, la utilización responsable de nuevas tecnologías, la conservación del germoplasma y la participación de los agricultores serán fundamentales para desarrollar variedades productivas, resilientes y adecuadas para los sistemas agrícolas afectados por una disponibilidad de agua progresivamente más variable.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Naggar, A. M. M., Abd El-Salam, R. M., Badran, A. E. E., & El-Moghazi, M. M. A. (2017). Drought tolerance of five quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes and its association with other traits under moderate and severe drought stress. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*, 3(3), 1–13. <https://doi.org/10.9734/AJAAR/2017/37641>
- Bazile, D., Jacobsen, S.-E., & Verniau, A. (2016). The global expansion of quinoa: Trends and limits. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 622. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>
- Gámez Guzmán, A. L. (2018). Evaluación del rendimiento y caracterización fisiológica de dos variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) sometidas a déficit hídrico bajo condiciones de invernadero [Trabajo de fin de máster, Universidad Pública de Navarra]. *Academica-e*. <https://academica-e.unavarra.es/entities/publication/ae923718-e447-475b-861f-97e90201bdfb>
- Hinojosa, L., González, J. A., Barrios-Masias, F. H., Fuentes, F., & Murphy, K. M. (2018). Quinoa abiotic stress responses: A review. *Plants*, 7(4), Article 106. <https://doi.org/10.3390/plants7040106>
- Jarvis, D. E., Ho, Y. S., Lightfoot, D. J., Schmöckel, S. M., Li, B., Borm, T. J. A., Ohyanagi, H., Mineta, K., Michell, C. T., Saber, N., Kharbatia, N. M., Rupper, R. R., Sharp, A. R., Dally, N., Boughton, B. A., Woo, Y. H., Gao, G., Schijlen, E. G. W. M., Guo, X., . . . Tester, M. (2017). The genome of *Chenopodium quinoa*. *Nature*, 542, 307–312. <https://doi.org/10.1038/nature21370>
- Murphy, K. M., Matanguihan, J. B., Fuentes, F. F., Gómez-Pando, L. R., Jellen, E. N., Maughan, P. J., & Jarvis, D. E. (2018). Quinoa breeding and genomics. *Plant Breeding Reviews*, 42, 257–320. <https://doi.org/10.1002/9781119521358.ch7>
- Peters, M. D. J., Marnie, C., Tricco, A. C., Pollock, D., Munn, Z., Alexander, L., McInerney, P., Godfrey, C. M., & Khalil, H. (2020). Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JBIE Evidence Synthesis*, 18(10), 2119–2126. <https://doi.org/10.11124/JBIES-20-00167>

Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., . . . Straus, S. E. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>

## CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

## DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. Esta herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

## FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Nombres de autores e iniciales:

Dayana Mishelle Sigüenza Sánchez (DMSS)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (DMSS)

Curación de datos: (DMSS)

Análisis formal: (DMSS)

Adquisición de fondos: (DMSS)

Investigación: (DMSS)

Metodología: (DMSS)

Administración del proyecto: (DMSS)

Recursos: No aplica

Software: (DMSS)

Supervisión: (DMSS)

Validación: (DMSS)

Visualización: (DMSS)

Redacción – Borrador original: (DMSS)

Redacción – Revisión y edición: (DMSS)