


Sequía, frío y salinidad: respuesta de la quínoa al desafío ambiental

Andrés Zurita-Silva

Ing. Agrónomo Mg. Sc. Dr., Investigador INIA Intihuasi
andres.zurita@inia.cl

Karina Ruiz

Investigadora Postdoctoral, Dr.
Laboratorio de Genómica Funcional & Bioinformática,
Departamento de Producción Agrícola, Universidad de Chile, Santiago
kbruiz@gmail.com



Diversidad panojas de quínoas en ensayos de terreno, Parcela Experimental Pan de Azúcar (PEPA), Coquimbo.

CONSIDERADA COMO UN CULTIVO EXCEPCIONAL POR SU CAPACIDAD DE ADAPTARSE A CONDICIONES AGROECOLÓGICAS DIVERSAS E, INCLUSO, EXTREMAS; LOS AUTORES DE ESTE ARTÍCULO DAN CONOCER LOS PRINCIPALES ATRIBUTOS Y RESPUESTAS DE ESTA PLANTA FRENTE A LOS ACTUALES DESAFÍOS DE CLIMA Y SUELO.

La quínoa es capaz de crecer en diversas condiciones de clima y suelo, con enorme variabilidad en la disponibilidad de nutrientes, un amplio rango de altitudes (desde el nivel del mar hasta 4.000 metros sobre el nivel de éste), y precipitaciones anuales que varían desde 2.000 mm hasta periodos de sequía prolongados. La plasticidad que permite a este cultivo crecer bajo condiciones ambientales desfavorables representa una oportunidad para la agricultura y un enorme potencial en relación a los desafíos presentes y futuros que imponen las cada vez más extremas oscilaciones climáticas, lo que sumado a los atributos funcionales en la alimentación que presentan sus granos, han contribuido a destacar este cultivo ancestral.

Dicha plasticidad adaptativa frente a los tipos de desafíos

ambientales o estrés abiótico imperante en estos agro-ecosistemas (sequía, salinidad y frío), se debe a la selección de distintos genotipos originados desde los cinco ecotipos existentes, ligados a sub-centros de diversidad descritos previamente (Bertero *et al.* 2004). Su adaptabilidad a ecosistemas naturales y cultivados ha hecho de la quínoa un modelo sobresaliente para aprender tanto de los efectos sobre el crecimiento y desarrollo, como de diversas respuestas a nivel de follaje y sistema radicular. Muchos de los atributos de este cultivo han sido revisados y se encuentran disponibles gratuitamente en la publicación "Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013", publicación FAO/CIRAD en el marco del Año Internacional de la Quinua (BAZILE *et al.* 2014; <http://www.fao.org/3/a-i4042s/index.html>).

RESPUESTAS DE LA QUÍNOA A LA SEQUÍA

En general, las plantas presentan diferentes estrategias de adaptación como respuesta al déficit hídrico, a nivel fisiológico y morfológico, las cuales se podrían dividir en dos categorías principales: evitar y tolerar el estrés.

Frente a la sequía, las plantas cambian o modifican sus procesos fisiológicos fundamentales, tales como la fotosíntesis, la respiración, el ahorro de agua interno, y el metabolismo de hormonas y de compuestos antioxidantes. Dichas respuestas implican, además, cambios en el crecimiento de los brotes y las raíces, y en algunos casos una fuerte modificación del ciclo de vida, la arquitectura y la productividad de las plantas (Zurita-Silva *et al.* 2014).

Los objetivos de los meca-

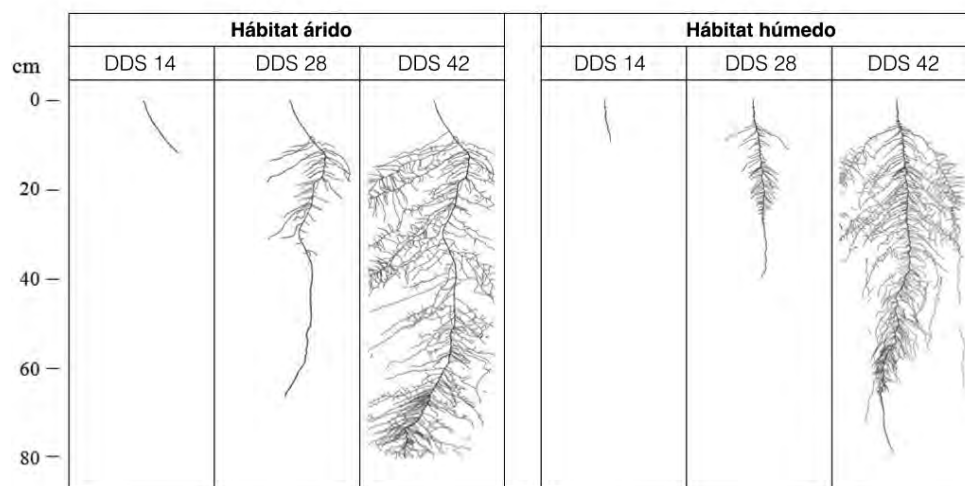


Figura 1. Curso temporal del crecimiento de las raíces en dos ecotipos de quínoa de hábitats contrastantes: de los salares (hábitat árido) y del nivel del mar (hábitat húmedo), a los 14, 28 y 42 días después de la siembra (DDS; adaptado de Zurita-Silva *et al.* 2014).

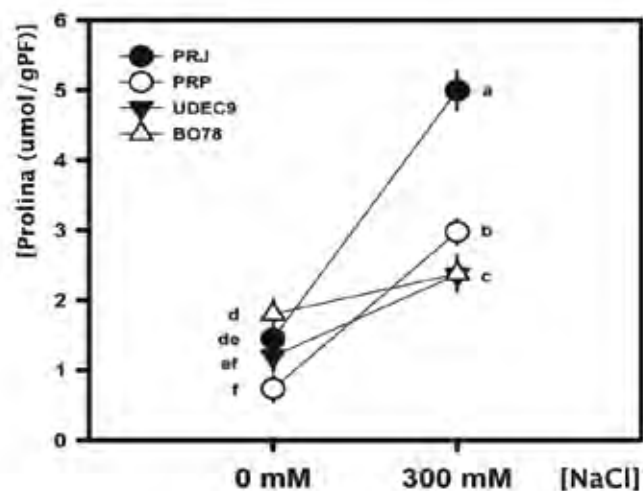


Figura 2. Concentración de Prolina (mmol/g PF) en plántulas de cuatro genotipos de quínoa (7 días después de sembrados) crecidos en medio de cultivo MS suplementado con 0 o 300 mM NaCl. Valores promedio de 3 experimentos (+2S.E.), y letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0.05$). Adaptado de Ruiz-Carrasco *et al.* 2011.

nismos al evitar el estrés son equilibrar la absorción y la pérdida de agua. La absorción de agua se ve mejorada por la acumulación de sustancias que ayudan a reducir el potencial hídrico de los tejidos, y por el aumento de crecimiento de las raíces, mientras que la pérdida de agua por evaporación es limitada por el cierre de los estomas (poros de las hojas), lo que disminuye el intercambio gaseoso, restringe el crecimiento de brotes y acelera la senescencia foliar, disminuyendo la productividad de la planta.

Por otra parte, los mecanismos de tolerancia al estrés tienen por objeto proteger contra el daño a nivel interno (celular), cuando este factor se vuelve más severo y los mecanismos para evitarlo ya no son suficientes. Este segundo tipo de mecanismos incluye disminuir la toxicidad de las especies reactivas de oxígeno (ROS), compuestos que se generan por diversos tipos de estrés, la acumulación de proteínas protectoras tipo LEA (Late Embryogenesis Abundant), y la acumulación de solutos, como la prolina, que actúa como osmolito compatible y mantiene el volumen celular. Las respuestas de evitar y tolerar el estrés son reguladas mayoritariamente por la hormona ABA (ácido abscísico).

La quínoa posee una capacidad excepcional para enfrentar la escasez de agua sobre la base de su bajo requerimiento de agua intrínseco, y la característica de recuperar rápidamente el nivel fotosintético y área foliar específica después de un período de sequía. Como estrategia para evitar la sequía, reduce el área foliar por desprendimiento de hojas, y a nivel celular presenta paredes pequeñas y gruesas que preservan la turgencia, incluso después de severas pérdidas de agua.

Además, ha desarrollado características morfológicas y anatómicas en respuesta a la sequía, como la presencia de vesículas que contienen oxalato de calcio en tallos y hojas, epidermis cuticulares gruesas (en hojas) y estomas hundidos. Se ha demostrado que posee una alta eficiencia fotosintética, que se mantiene a pesar del déficit hídrico. La tolerancia de la quínoa ha sido atribuida además a su sistema radicular ramificado y profundo que penetra hasta 1,5 metros en suelos arenosos (Álvarez-Flores, 2012).

Asimismo, la quínoa puede escapar de la sequía mediante precocidad o acortando el ciclo del cultivo, lo cual es muy importante en áreas donde el riesgo de

sequía aumenta hacia el final de la temporada de crecimiento (sequía terminal). Esto hace que sea muy apta para el cultivo en regiones áridas y semiáridas. Por ejemplo se ha cultivado con éxito en India, Marruecos, Egipto y Mali, en condiciones de riego muy limitado o bien dependiente de precipitaciones cada vez más escasas.

ADAPTACIONES DE LAS RAÍCES FRENTE A SEQUÍA

Las raíces (sistema radicular) son un órgano complejo de la planta con funciones fundamentales: anclaje y exploración del suelo, absorción y transporte de agua y nutrientes, síntesis y secreción de metabolitos. Cuando la absorción de agua o el transporte de agua por los tejidos conductores del xilema se hacen insuficientes para satisfacer la evapotranspiración, como ocurre en casos de déficit hídrico, las plantas ven afectado tanto su crecimiento (disminuye acumulación de materia seca), como su fenología (se acelera ciclo de vida).

En cuanto al sistema radicular de la quínoa, se ha demostrado que la distribución de la biomasa acumulada entre raíces y brotes no se ve mayoritariamente alterada por el déficit de agua, lo

cual sugiere la intervención de otros mecanismos adaptativos en respuesta a la sequía (Zurita-Silva *et al.* 2014).

Bajo déficit hídrico, las raíces de dos ecotipos contrastantes, de salares y del nivel del mar, presentaron una forma tipo "espinas de pescado", que implicó una mayor reducción en el crecimiento de raíces laterales que en raíces primarias (Álvarez-Flores 2012). De hecho, en caso de sequía temprana, el alargamiento de la raíz primaria se considera beneficioso para la adquisición del agua más profunda y segura, mientras que una ramificación radicular densa podría conducir al rápido agotamiento del agua presente en capas más superficiales.

Las principales diferencias entre los ecotipos estudiados fueron que el sistema radicular del ecotipo de salares presenta un alargamiento más rápido y una colonización más densa en profundidad (Álvarez-Flores 2012). Asimismo, el déficit hídrico reduce la longitud total de los sistemas radicales, con una disminución menor en el ecotipo de los salares -38% contra -57% en el ecotipo del nivel del mar. Tal disminución es resultado de un número reducido de segmentos de raíces, con una diferencia entre ecotipos: el número de segmentos se redujo sólo un 8% en la quínoa de los salares versus 23% en la quínoa del nivel del mar. Esto podría representar una diferencia ecotípica significativa en las raíces en cuanto a la absorción de agua y la sensibilidad a la sequía (Álvarez-Flores 2012).

Cabe destacar que el déficit hídrico estimula la elongación de la raíz primaria en ambos ecotipos en comparación con control no-limitado en riego. En el ecotipo de los salares las raíces primarias crecieron hasta 50 cm durante las primeras cuatro semanas

bajo condiciones no-limitantes, mientras que alcanzaron los 75 cm bajo déficit hídrico. En cambio, el ecotipo del nivel del mar presentó valores de 35 y 40 cm, respectivamente, en las mismas condiciones (Figura 1). El rápido alargamiento de la raíz primaria permitió al ecotipo de los salares producir raíces laterales distribuidas de manera uniforme a través de todo el perfil del suelo. En contraste, el ecotipo del nivel del mar concentró sus raíces laterales en las capas de suelo de entre 5 y 50 cm y mostró una escasa densidad de raíces en las capas más profundas del suelo (Álvarez-Flores 2012).

RESPUESTAS AL FRÍO

Las heladas son uno de los principales factores que limitan la agricultura en las regiones Andinas de altura y en el sur de Chile. Por lo general, la quínoa es menos afectada que la mayoría de los cultivos por las heladas, pero sus mecanismos específicos de resistencia al frío son menos conocidos. No obstante, algunos parámetros que afectan el rendimiento y la sobrevivencia han sido fijados, como el contenido de azúcares solubles, proteínas y prolina, con el fin de desarrollar criterios para la selección de genotipos y generar cultivares con mayor resistencia al frío.

Se ha determinado que plántulas de dos hojas verdaderas provenientes de cultivares del altiplano peruano (3.800 msnm), toleran temperaturas de -8°C por 4 horas, mientras que otro cultivar de los valles Andinos toleran la misma temperatura durante 2 horas solamente. A -4°C, la tasa de mortalidad de plántulas se incrementa desde 25% con humedad relativa alta, hasta 56% con humedad relativa baja (Jacobsen *et al.* 2005).

Otro aspecto interesante es que el efecto sobre el rendimiento

varía dependiendo del estado de desarrollo de la planta: con temperaturas de -4°C aplicadas en dos hojas verdaderas, el rendimiento de semillas se reduce en un 9% comparado al control en plantas no expuestas a frío. En cambio, el mismo tratamiento aplicado en los estados de 12-hojas verdaderas y floración, reduce los rendimientos en 51 y 66%, respectivamente, indicando que el frío durante 2 h o más durante anthesis causa un daño significativo.

En general, un nivel adicional de azúcares solubles implica una mayor tolerancia al frío, resultando en mayores rendimientos. Este mismo grupo de investigadores determinó más tarde que la quínoa presenta capacidad de sobre-enfriamiento ("supercooling"), mecanismo que previene el daño inmediato por temperaturas congelantes, permitiendo evitar la formación de hielo mediante la acumulación de azúcares solubles como glucosa y la citada prolina, los cuales provocan una disminución en el punto de congelamiento, contribuyendo al sobre-enfriamiento y a disminuir la temperatura letal de la quínoa.

RESPUESTAS DE LA QUÍNOA AL ESTRÉS SALINO

Dado el impacto de la salinidad en la agricultura y su asociación al manejo del riego, la tolerancia a la sal es un carácter agrónomicamente muy importante.

La quínoa ha demostrado ser tolerante a salinidad del suelo, y considerando su diversidad por los ecotipos adaptados al valle, altiplano, salares, nivel del mar y los trópicos, sugiere variabilidad genética de la tolerancia a este factor. Existen ejemplos donde se ha estudiado y comparado diferentes genotipos de quínoa por su respuesta a condiciones de salinidad, demostrando que éste es



Figura 3. Quínoa creciendo en suelo salino (general).

un rasgo complejo y multigénico. La quínoa ha mostrado una elevada tolerancia a condiciones de salinidad moderada a alta, siendo capaz de formar semillas incluso en solución de Cloruro de Sodio con conductividad eléctrica (EC) de 42,2dS/m (similar al agua de mar), demostrando su naturaleza halófila, o sea de plantas que crecen de manera natural en áreas afectadas por salinidad en raíces y/o brotes. Los mecanismos de tolerancia a la salinidad presentes en esta especie involucran complejas respuestas a nivel morfológico, fisiológico y molecular, ya que deben enfrentar los dos principales efectos provocados por la salinidad: el efecto osmótico o sequía fisiológica, y el efecto iónico o acumulación de sales en los tejidos.

Dentro de los mecanismos orientados a contrarrestar el componente osmótico de la salinidad, se encuentran la protección del embrión de las semillas, gracias a proteínas conocidas como dehidrinas, la neutralización de las especies reactivas de oxígeno (ROS) por azúcares solubles (solutos compatibles) como manitol, mio-inositol, y otros compuestos orgánicos como prolina (mecanismo similar al estrés por sequía y frío).

Recientemente se ha determinado que la tolerancia a la salinidad se asocia a la acumulación de prolina en genotipos más tolerantes (Figura 2; Ruiz-Carrasco *et al.* 2011).

También se altera la regulación del metabolismo de poliaminas y glicina-betaína, aumentando su acumulación y actividad protectora (tipo chaperona); por otra parte la regulación de la conductancia estomática y la reducción de número de estomas ayuda a mejorar la economía hídrica de la planta, y la presencia de vesículas en las hojas que ayudan a dismi-

nuir la pérdida de agua, como una epidermis secundaria.

En tanto, para contrarrestar el componente iónico de la salinidad, la quínoa posee un sofisticado sistema de exclusión de la sal, gracias a transportadores de Sodio y Potasio localizados en las membranas de células y organelos, permitiendo que las zonas de crecimiento activo (meristemas) acumulen menores concentraciones de sal que el resto de los tejidos, acumulando el exceso de sodio en vacuolas celulares (compartimentalización), y excluyendo el exceso de sal desde las raíces o regulando su transporte hacia los brotes nuevos, incrementando la absorción de Potasio y manteniendo una relación Potasio/Sodio en niveles aceptables en presencia de salinidad en el medio externo (Ruiz-Carrasco *et al.* 2011).

Finalmente, pero no menos importante, existen múltiples evidencias que indican que las propiedades nutricionales de la quínoa no se ven afectadas en condiciones de alta salinidad y que, en algunos casos, incluso mejora la acumulación de compuestos con propiedades funcionales, tales como fibra, compuestos fenólicos y tocoferol (Biondi *et al.* 2014).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La quínoa soporta condiciones climáticas extremas en varias regiones de su área de distribución, especialmente en el altiplano sur de Bolivia, el norte de Chile y noroeste de Argentina. En el sur de Bolivia, el cultivo enfrenta sequías frecuentes debido a la precipitación baja e irregular y la alta demanda evaporativa, además de una alta probabilidad de heladas y radiación solar extrema debido a la altitud elevada.

Las respuestas y mecanismos para hacer frente a la sequía se

incluyen en dos grandes estrategias: la evitación del estrés y la tolerancia del estrés. Sin embargo, esta especie ha mostrado una capacidad excepcional para equilibrar absorción y pérdida de agua (y así evitar el déficit hídrico)

La quínoa mejora la absorción de agua a través de la acumulación de solutos como prolina para disminuir el potencial hídrico del tejido y la modificación de la arquitectura radicular, así como un ajustado control estomático, restringiendo el crecimiento de brotes y acelerando la senescencia foliar para limitar su pérdida de agua por evaporación. Asimismo, presenta mecanismos que le permiten soportar efectos osmóticos (sequía fisiológica) e iónicos (acumulación de sales), representando así un cultivo con un extraordinario potencial para climas adversos, manejos agrícolas con baja intervención y terrenos marginales.

Con la incorporación de nuevas tecnologías y estrategias, como la integración de estudios fisiológicos, agronómicos, y genómicos, todo el potencial de la variabilidad genética de la quínoa se podrá utilizar para generar nuevas variedades más tolerantes a condiciones ambientales desfavorables (Zurita-Silva *et al.* 2014); ésta también representa una fuente novedosa para el descubrimiento de genes que podrían servir en otros cultivos de importancia agrícola.

Todas estas características hacen de la quínoa un modelo de cultivo excepcional para la investigación de los mecanismos fisiológicos, morfológicos, celulares y moleculares en la base de la tolerancia al estrés abiótico (sequía, frío, salinidad) en las plantas en su conjunto, contribuyendo a la seguridad alimentaria y a enfrentar las condiciones adversas que imponen las oscilaciones generadas por los cambios climáticos. 🌱