

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

Influencia del fotoperíodo y tipo de luz en la fenología, crecimiento y rendimiento de la quinoa (*Chenopodium quinoa*).

Dayana Paola Herrera Flores

Carrera: Ingeniería en Biotecnología

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera en Biotecnología

Quito, 18 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Influencia del fotoperíodo y tipo de luz en la fenología, crecimiento y
rendimiento de la quinoa (*Chenopodium quinoa*).**

Dayana Paola Herrera Flores

Nombre del profesor, Título académico

Milton Gordillo, MSc

Quito, 18 de diciembre de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Dayana Paola Herrera Flores

Código: 00320755

Cédula de identidad: 1726675224

Lugar y fecha: Quito, 18 de diciembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un pseudocereal andino conocido por su alta adaptabilidad a diversos ambientes y su tolerancia a factores de estrés externos. Además, destaca por su alto contenido proteico y valor nutricional, lo que ha incrementado su popularidad en países de Europa y América del Norte, regiones que presentan fotoperiodos más largos en comparación a su zona de origen. El presente estudio analiza la influencia de dos fotoperiodos (12/12 y 16/8) y dos tipos de luz (luz blanca y luz rojo lejano) sobre tres aspectos principales de la quinoa: su fenología, crecimiento y rendimiento. Para ello, se trabajó con cuatro genotipos: dos europeos (Bastille y Atlas) y dos ecuatorianos (Tunkahuán y 3_Carchi), cultivados bajo condiciones controladas en un cuarto de crecimiento, utilizando luces LED y un diseño experimental del tipo split-plot row-column. Los resultados obtenidos muestran que el fotoperiodo es un factor determinante en la duración de las etapas fenológicas, el rendimiento y la altura final de las plantas. Por otro lado, la luz rojo lejano influye en aspectos específicos, como la aceleración de la floración en los genotipos ecuatorianos bajo su fotoperiodo natural (12/12) y el aumento general del crecimiento. En los genotipos europeos, el cambio a un fotoperiodo corto aceleró su ciclo de vida, reduciendo la altura de las plantas y la producción de semillas. En contraste, el cambio a un fotoperiodo largo en los genotipos ecuatorianos prolongó la duración de su ciclo de vida, alargando todas las etapas fenológicas y retrasando la producción de semillas. Estos resultados demuestran la importancia del fotoperiodo y el tipo de luz como factores clave para optimizar el cultivo y el rendimiento de la quinoa en regiones fuera de su zona de origen.

Palabras clave: Quinoa, *Chenopodium quinoa*, fotoperiodo, Luz rojo lejano, fenología

ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is an Andean pseudocereal known for its high adaptability to diverse environments and tolerance to external stress factors. Additionally, its high protein content and nutritional value have increased its popularity in European and North American countries, regions with longer photoperiods compared to its native area. This study analyzes the influence of two photoperiods (12/12 and 16/8) and two light types (white light and far-red light) on three main aspects of quinoa: phenology, growth, and yield. Four genotypes were used: two European (Bastille and Atlas) and two Ecuadorian (Tunkahuán and 3_Carchi), grown under controlled conditions in a growth chamber using LED lights and a split-plot row-column experimental design. Results show that photoperiod is a determining factor in the duration of phenological stages, yield, and final plant height. Moreover, far-red light influences specific traits, such as accelerating flowering in Ecuadorian genotypes under their natural photoperiod (12/12) and promoting overall growth. In European genotypes, a shift to a short photoperiod accelerated their life cycle, reducing plant height and seed production. In contrast, switching to a long photoperiod in Ecuadorian genotypes extended their life cycle, lengthening all phenological stages and delaying seed production. These results highlight the importance of photoperiod and light type as key factors for optimizing quinoa cultivation and yield in regions outside its native range.

Key words: Quinoa, *Chenopodium quinoa*, photoperiod, far-red light, phenology

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1.1 Características de la quinoa	9
1.2 Importancia del cultivo de la quinoa	9
1.3 Fotoperiodo en el desarrollo de las plantas	10
1.4 Estudio de procesos fisiológicos con luces.....	11
1.5 Objetivos del estudio	12
MÉTODOS	13
2.1 Material vegetal	13
2.2 Fotoperiodo y tratamientos de luz.....	13
2.3 Diseño experimental.....	14
2.4 Condiciones de cultivo.....	14
2.5 Protocolo de cosecha	14
2.6 Toma de datos y análisis	15
2.8 Análisis estadísticos.....	15
RESULTADOS	16
3.1 Análisis de la fenología.....	16
3.2 Análisis de crecimiento	17
3.3 Análisis del rendimiento.....	19
DISCUSIÓN	20
4.1 Influencia del fotoperiodo y luz en las etapas fenológicas.....	20
4.2 Efecto del fotoperiodo y luz en el crecimiento.....	21
4.3 Influencia del fotoperiodo y luz en el rendimiento	23
CONCLUSIONES	24
FIGURAS	25
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
ANEXOS.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Gráfico de barras apiladas del tiempo que le toma a Bastille (A), Atlas (B), Tunkahuán (C) y 3_Carchi (D) pasar de un estadio fenológico a otro 25
- Figura 2.** Curvas de crecimiento de los 4 genotipos: Bastille (A), Atlas (B), Tunkahuán (C) y 3_Carchi (D) a lo largo de los 210 días del experimento 26
- Figura 3.** Gráfico de barras de la altura final de los 4 genotipos: Bastille (A), Atlas (B), Tunkahuán (C) y 3_Carchi (D) al momento de la cosecha en su respectivo tratamiento de luz y fotoperiodo 27
- Figura 4.** Diagramas de cajas del peso total de semillas correspondientes a los 4 genotipos: Bastille (A), Atlas (B), Tunkahuán (C) y 3_Carchi (D) en su respectivo tratamiento de luz y fotoperiodo 28

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Diseño experimental split-plot row-column	32
Anexo 2. Agrupación de los cambios fenológicos en la quinoa	33

INTRODUCCIÓN

1.1 Características de la quinoa

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un pseudocereal alotetraploide, dicotiledóneo de la familia Amaranthaceae, y ha sido un alimento básico para las poblaciones indígenas de los Andes que data de hace más de 5000 años (Präger et al., 2018; Arendt et al., 2013). Esta planta herbácea anual produce semillas planas y ovaladas, que varían en color desde el amarillo pálido hasta el rosa y negro, y destaca por sus valiosas características nutricionales (Abugoch, 2009). Las semillas de quinoa son ricas en almidón, hierro, magnesio, vitaminas E y B, cobre, fósforo y fibra. En comparación con otros granos esenciales como el arroz y el trigo, la quinoa se distingue por su mayor contenido de proteínas, lípidos y minerales. Su contenido proteico, que oscila entre el 13,1% y el 16,7%, supera al del arroz, cebada, maíz y centeno, siendo comparable al del trigo (Vilcacundo & Hernández, 2016). Además, la proteína de quinoa es de alta calidad, ya que contiene todos los aminoácidos esenciales en un equilibrio que cumple con los requerimientos nutricionales establecidos por la UNU para adultos (Rojas et al., 2009). Es por eso que la producción de quinoa ha aumentado en la actualidad dado el alto valor nutricional que tiene, por lo que se considera a la quinoa como “uno de los granos del siglo XXI” (Abugoch, 2009).

1.2 Importancia del cultivo de la quinoa

La quinoa es una planta cultivada tradicionalmente en países como Perú, Bolivia, Colombia, Chile y Ecuador, aunque en los últimos tiempos existe una tendencia creciente de cultivo en países europeos, en África y en América del Norte (Vilcacundo & Hernández, 2016). La quinoa es un cultivo con características intrínsecas sobresalientes, destacando su amplia variabilidad genética, lo que le permite adaptarse a una gran diversidad de ambientes (Hinojosa et al., 2018). Este cultivo puede prosperar desde el nivel del mar hasta los 4000 msnm, en

condiciones semiáridas, montañosas y frías, mostrando tolerancia a la sequía, al frío y, en algunos casos, a la salinidad (Hinojosa et al., 2018). Alrededor del mundo existen más de 16000 accesiones de quinoa conservadas en distintos bancos de germoplasma localizados mayoritariamente en institutos andinos (Jaramillo, 2021). Esta amplia diversidad se puede clasificar en 5 ecotipos principales basados en sus adaptaciones geográficas: en el Valle Interandino, en el Altiplano a más de 3000 msnm, en los Salares de Bolivia y Chile, Costeros a nivel de mar y los subtropicales o Yungas (Hinojosa et al., 2018).

1.3 Fotoperiodo en el desarrollo de las plantas

El fotoperiodo es considerado un factor clave en la supervivencia y adaptación de las plantas a sus hábitats. Éste se define como la exposición a la luz y a los periodos de oscuridad en un ciclo de 24 horas. Las plantas detectan esta señal mediante los foto-receptores, proteínas sensibles a la luz que detectan las diferentes longitudes de onda y que son capaces de enviar mensajes para regular la expresión de los genes (Osnato et al., 2022). En general, la rotación de la tierra y la intensidad de la luz, son las principales condiciones ambientales que causan la diferencia de exposición a la luz, generando distintos fotoperiodos como son los días largos y los días cortos (Sanchez et al., 2003).

Respecto a la fenología o ciclo biológico de los organismos vivos, el ciclo de vida de plantas como la quinoa se puede dividir en tres etapas fisiológicas principales: el desarrollo vegetativo; que va desde la germinación hasta la iniciación floral, el desarrollo reproductivo; que trata de la iniciación floral hasta su polinización y el llenado de grano; que incluye desde la polinización hasta la madurez fisiológica (Bertero et al., 1999). Por otro lado, el fotoperiodo es una señal externa del ambiente que afecta directamente al desarrollo de las plantas, puesto que se ha encontrado que la exposición a la luz impacta en las fases del desarrollo de las plantas. Esto se puede ver en las plantas de regiones templadas, que florecen en días largos, mientras que las

plantas tropicales prefieren los días cortos (Stephen, 2009). Sin embargo, estas respuestas son complejas y en la mayoría de los casos están asociadas a diversos factores ambientales.

1.4 Estudio de procesos fisiológicos con luces

El estudio de los procesos fisiológicos en plantas bajo diferentes condiciones de luz es crucial, ya que la luz es un recurso primario que influye directamente en el desarrollo, fisiología y el rendimiento de las plantas. Se ha encontrado que la calidad y cantidad de luz pueden inducir cambios morfológicos significativos, como es el alargamiento del tallo de la planta o la reducción de ramas, respuestas que están reguladas por el sistema fitocromo (Wan & Sosebee, 1998). El fitocromo es un fotorreceptor asociado a longitudes de onda entre 600-750 nm, que hacen referencia al espectro de luz entre rojo y rojo lejano (Meisel et al., 2011). Este tipo de luz pueden provocar respuestas fotomorfológicas específicas, ya que simulan el efecto de un dosel denso, que disminuye la cantidad de luz recibida y genera una absorción selectiva de diferentes longitudes de onda por el tejido verde (Wan & Sosebee, 1998). Además, la luz y el fotoperiodo son determinantes clave en la plasticidad fenológica de cultivos como la quinoa, influyendo en el tiempo de floración, un factor fundamental para el rendimiento del grano (Bertero et al., 2003; Curti et al., 2014). Conocer los factores ambientales que controlan las etapas fenológicas de un cultivo, especialmente del tiempo de floración, como el fotoperiodo, es esencial para predecir las adaptaciones de la quinoa en diversos entornos.

1.5 Objetivos del estudio

Evaluar la influencia de dos fotoperiodos (12/12 y 16/8) y dos tipos de luces (Luz Blanca y Rojo lejano) en el crecimiento, fenología y rendimiento de 4 genotipos distintos de quinoa: Bastille, Atlas, Tunkahuán y 3_Carchi.

MÉTODOS

2.1 Material vegetal

Para evaluar la influencia de dos fotoperiodos y dos tipos de luces en la fenología, crecimiento y rendimiento de la quinoa, se utilizaron 4 genotipos; 3 variedades comerciales (Bastille, Atlas y Tunkahuán), y una accesión del banco de germoplasma de la USFQ (3_Carchi). Bastille, desarrollada por AbbotAgra (Francia), es una variedad catalogada de ciclo medio-corto y floración temprana, que en el hemisferio norte tiene un ciclo de vida de aproximadamente 120 días y rinde 2.8 t/ha (De Bock et al., 2021). Atlas es una variedad desarrollada por Wageningen University & Research (Países bajos) caracterizada por ser de ciclo largo y floración tardía, con un ciclo de vida de aproximadamente 150 días y un rendimiento de 3 t/ha (De Bock et al., 2021). Por otro lado, Tunkahuán es una variedad ecuatoriana desarrollada por INIAP adaptada al clima y fotoperiodo de la región andina ecuatorial, caracterizada por tener un ciclo de vida de aproximadamente 180 días, y un rendimiento de 3 t/ha (Peralta et al., 2009). Por último, 3_Carchi es una accesión ecuatoriana adaptada a fotoperiodo corto, con un ciclo de vida de 200 días en campo, que se ha visto que tiene potencial de adaptarse a fotoperiodos largos (Comunicación personal).

2.2 Fotoperiodo y tratamientos de luz.

Para evaluar la respuesta de los 4 genotipos frente a días cortos y días largos, se aplicó un fotoperiodo corto (12/12), representativo de la región andina ecuatorial, y un fotoperiodo largo (16/8), característico del verano en el norte de Europa. Los tratamientos lumínicos fueron: luz blanca de espectro completo (200 mmol m⁻²s⁻¹) y luz blanca (200 mmol m⁻²s⁻¹) + rojo lejano (100 mmol m⁻²s⁻¹). De aquí en adelante nos referiremos a estos tipos de luces como:

luz blanca y luz rojo lejano, respectivamente. Para el experimento se utilizaron luces LED ELIXIA (Heliospectra).

2.3 Diseño experimental

Se utilizó un diseño de parcelas divididas (14split-plot row-column), con un arreglo factorial de 2x2x4 (Anexo 1). El fotoperiodo, con dos niveles (12/12 y 16/8), se asignó a las parcelas principales, mientras que el tipo de luz (luz blanca y luz rojo lejano), se aplicó en las subparcelas. En cada combinación de fotoperiodo y luz, se sembraron los 4 genotipos aleatoriamente, con 8 repeticiones por tratamiento, obteniendo un total de 128 plantas.

2.4 Condiciones de cultivo

Al inicio del experimento, se sembraron 10 semillas por maceta utilizando vermiculita como sustrato, y posterior a la germinación, se seleccionó una única planta por maceta para continuar su monitoreo. La siembra se llevó a cabo el 22 de febrero de 2024 en macetas de 0.6 L, ubicadas en el cuarto de cultivo del Laboratorio de Biotecnología Vegetal. El riego de las plantas se realizó cada 3 días con 50 ml de solución de Hoagland 0.5X para asegurar un adecuado suministro de nutrientes.

2.5 Protocolo de cosecha

La cosecha se realizó después de que las plantas alcanzaron la senescencia, y las que no llegaron a esta etapa se cosecharon una vez alcanzados los 210 días del experimento, dado que el tiempo que toma en completar el ciclo al genotipo con el ciclo más largo es de 200 días en campo. La cosecha consistió en la separación de la panícula (inflorescencia) principal, las panículas secundarias y el tallo con las hojas de la planta, los cuales fueron almacenados en distintos empaques correctamente identificados. A continuación, estas muestras se secaron en un horno a 35 °C por 48 horas, para resguardar la viabilidad de las semillas. Posteriormente, se

tomaron datos del peso de los tres componentes: la panícula principal, las panículas secundarias y la biomasa total. Por último, se realizó la limpieza de las panículas, separando los residuos de biomasa de las semillas, con el fin de obtener el peso de la semilla limpia.

2.6 Toma de datos y análisis

Para evaluar el efecto del fotoperiodo y la luz sobre los 4 genotipos de quinoa, analizamos tres aspectos principales: fenología, crecimiento y rendimiento. Los datos fenológicos se recopilaron dos veces por semana, los lunes y jueves, registrando los cambios en los estadios de: crecimiento vegetativo, floración, llenado de grano y senescencia (ver Anexo 2). El crecimiento se evaluó midiendo la altura de las plantas con un flexómetro semanalmente. Para el análisis del rendimiento, se obtuvieron los datos de biomasa total y peso de semilla limpia por panícula.

2.8 Análisis estadísticos

Los datos obtenidos fueron evaluados en Rstudio. Dado que la distribución de la intensidad de la luz generada por las lámparas no es homogénea sobre el área donde se encuentran distribuidas las plantas, se utilizó el paquete statgenSTA para compensar estas diferencias, mediante un modelo de corrección espacial. Primero se comprobó la igualdad de varianzas y la normalidad con las pruebas estadísticas de Levene y Shapiro-Wilk. Con los datos que cumplen estos supuestos se llevó a cabo el análisis de varianza (ANOVA) $p < 0.05$ y una prueba post-hoc Tukey-HSD (Montgomery et.al., 2013), mientras que con los datos que no cumplieron estos supuestos se realizó el test de Kruskal-Wallis, seguida de un test de Dunn.

RESULTADOS

3.1 Análisis de la fenología

En general, se observó un patrón distintivo entre las variedades europeas (Bastille y Atlas) y las ecuatorianas (Tunkahuán y 3_Carchi), en donde Bastille fue el genotipo que alcanzó la senescencia más rápidamente en todos los tratamientos (Figura 1). En las variedades europeas, adaptadas al fotoperiodo 16/8, los únicos cambios fenológicos se presentaron en la fase de llenado de grano, ya que en las fases de crecimiento vegetativo y floración no se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$) (Figura 1 A y B). En condiciones de verano europeo (16/8 y luz blanca), Bastille completó el llenado de grano en un promedio de 129 días, coherente con los días reportados en campo (120 días). Al aplicar un fotoperiodo más corto, el ciclo de vida de la planta se redujo a 90 días. Este mismo patrón se observó en Atlas, que en su tratamiento normal (16/8, luz blanca), las plantas finalizaron el llenado de grano en 155 días, similar a los días en campo (150 días), mientras que el fotoperiodo corto (12/12) acortó a 114 días. El efecto de la luz rojo lejano en la fenología de las variedades europeas fue mínimo, ya que no se encontraron diferencias significativas en el tiempo de llenado de grano entre las distintas luces dentro de un mismo fotoperiodo ($p > 0,05$) (Figura 1, A y B).

En las variedades ecuatorianas Tunkahuán y 3_Carchi, adaptadas al fotoperiodo corto (12/12), las fases de crecimiento vegetativo, floración y llenado de grano presentaron variaciones significativas por influencia del fotoperiodo y tipo de luz (Figura 1, C y D). En condiciones de la región andina ecuatorial (fotoperiodo 12/12 y luz blanca), Tunkahuán mostró un crecimiento vegetativo promedio de 68 días, el cual se extendió hasta 105 días bajo un fotoperiodo largo (16/8 y luz blanca). Este patrón se observó también en 3_Carchi, donde el crecimiento vegetativo duró 97 días en condiciones normales (12/12 y luz blanca),

extendiéndose hasta 125 días en el fotoperiodo largo (16/8). El análisis indicó que el crecimiento vegetativo se agrupó por fotoperiodo, mostrando diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los tratamientos de 12/12 y 16/8, sin diferencias entre tipos de luz. En la etapa de floración, la aplicación de luz rojo lejano al fotoperiodo normal (12/12) en Tunkahuán y 3_Carchi redujo significativamente el tiempo hasta la floración en comparación con los demás tratamientos ($p < 0,05$). Durante el llenado de grano, Tunkahuán alcanzó mayormente la senescencia en su fotoperiodo normal (12/12). En condiciones típicas de la región andina ecuatorial (12/12 y luz blanca), Tunkahuán completó el llenado de grano en 51 días. No obstante, con luz rojo lejano en el mismo fotoperiodo, esta etapa se alargó significativamente hasta los 92 días. En el fotoperiodo largo (16/8) la mayoría de las plantas no lograron completar el llenado (Figura 1, C). Este efecto del fotoperiodo fue aún más evidente en 3_Carchi, donde ninguna planta completó el llenado de grano hasta el día 210 bajo el fotoperiodo largo (16/8). En contraste, en el fotoperiodo normal (12/12 y luz blanca), 3_Carchi tardó 52 días en completar el llenado de grano, que se extendió a 75 días bajo luz rojo lejano (Figura 1, D).

3.2 Análisis de crecimiento

Las curvas de crecimiento reflejan los cambios en la altura de las plantas hasta los 210 días del experimento (Figura 2), mostrando un patrón general en el que los genotipos estabilizan su altura al llegar al estadio fenológico de llenado de grano. Este patrón se observó claramente en las variedades europeas Bastille y Atlas, ya que completaron su ciclo en todos los tratamientos (Figura 2, A y B). En particular, Bastille, bajo condiciones de verano europeo (16/8 y luz blanca), estabiliza su crecimiento a los 67 días; sin embargo, con un fotoperiodo más corto (12/12 y luz blanca), el crecimiento se estabiliza precozmente a los 49 días. Al añadir luz rojo lejano, el tiempo para estabilizar la altura aumenta, tomando 81 días en el fotoperiodo largo (16/8) y 67 días en el corto (12/12). Atlas muestra patrones similares con diferencias de

tiempo más pronunciadas: en condiciones de verano europeo (16/8 y luz blanca), estabiliza su crecimiento a los 115 días, mientras que con un fotoperiodo más corto (12/12 y luz blanca) lo hace a los 77 días. Por otro lado, en las variedades ecuatorianas Tunkahuán y 3_Carchi, solo las plantas bajo el fotoperiodo característico de estas variedades (12/12) alcanzaron la senescencia y completaron el llenado de grano, tanto con luz blanca como con luz rojo lejano (Figura. 2, C y D). En sus condiciones normales (12/12 y luz blanca), Tunkahuán y 3_Carchi completaron su ciclo, alcanzando la senescencia a los 173 y 194 días, respectivamente. Sin embargo, al aplicar luz rojo lejano, Tunkahuán completó su ciclo en 181 días y 3_Carchi en 179 días, ligeramente más rápido que bajo condiciones de la región Andina ecuatorial. Con fotoperiodo largo (16/8) y luz blanca, solo algunas plantas de Tunkahuán (5 de 8) completaron el llenado de grano, mientras que 3_Carchi no logró terminar su ciclo. Con luz rojo lejano, ninguno de los genotipos completó su ciclo en los 210 días del experimento.

En los gráficos de alturas finales (Figura 3) se observó de manera general que el fotoperiodo largo (16/8) generó plantas con mayor altura, en comparación con el fotoperiodo corto (12/12), en ambos tratamientos lumínicos (luz blanca y rojo lejano). De igual forma, se observó que el tipo de luz rojo lejano generó plantas con mayor altura en comparación a la luz blanca, con excepción de los genotipos ecuatorianos (Figura 3). Respecto a las variedades europeas de quinoa, Bastille y Atlas, bajo condiciones de verano europeo (fotoperiodo 16/8 y luz blanca), la altura promedio alcanzada por Bastille fue de 45 cm, mientras que Atlas llegó a 69 cm. Cuando se redujo la cantidad de luz (12/12 y luz blanca), el crecimiento de ambas variedades se vio afectado significativamente ($p < 0.05$). En estas condiciones, Bastille alcanzó solo 24 cm de altura, mientras que Atlas alcanzó solo 45 cm (Figura 3). Por otro lado, los genotipos ecuatorianos, Tunkahuán y 3_Carchi, presentaron un crecimiento mayor, con alturas de 209 cm y 198 cm respectivamente bajo luz roja lejano y fotoperiodo largo (16/8),

correspondientes a las plantas más altas de todos los tratamientos. Baja sus condiciones ecuatoriales (12/12 luz blanca) Tunkahuán midió 148 cm y 3_Carchi 165 cm, altura que aumentó a 181 cm y 183 cm bajo el fotoperiodo largo (16/8 luz blanca) respectivamente. Sin embargo, llama la atención que en los dos genotipos bajo el fotoperiodo corto (12/12) la altura alcanzada en luz blanca y luz rojo lejano no fue significativamente diferente ($p > 0,05$).

3.3 Análisis del rendimiento

Se observó que tanto en Bastille y Atlas, como en Tunkahuán y 3_Carchi el fotoperiodo es el factor determinante que produce cambios significativos en el peso total de semilla cosechada (Figura 4). Es decir, el peso total de semillas obtenido se agrupa en base al fotoperiodo sin importar el tratamiento de luz, con valores que son significativamente diferentes ($p < 0,05$). De forma específica en las variedades europeas el fotoperiodo que produce más semilla es el 16/8. Al aplicar un fotoperiodo corto (12/12) en luz blanca, Bastille presentó una reducción del 40% de peso de semilla (1,9 gramos), en comparación al fotoperiodo largo (16/8) en luz blanca (3,2 gramos). Por otro lado, Atlas presentó una reducción del 66% de peso de semilla (2,1 gramos), en comparación al fotoperiodo largo (16/8) en luz blanca (5,1 gramos). Respecto a las variedades ecuatorianas 3_Carchi no llegó a producir semillas en el fotoperiodo 16/8 hasta los 210 días del experimento, en ninguna de las luces, mientras que Tunkahuán no llegó a producir semillas al estar bajo el fotoperiodo largo (16/8) y la luz rojo lejano.

DISCUSIÓN

4.1 Influencia del fotoperiodo y luz en las etapas fenológicas

Este estudio investigó la influencia de dos fotoperiodos y dos tipos de luz en la fenología, el crecimiento y el rendimiento de distintos genotipos de quinoa. Con respecto a la fenología, para Bastille y Atlas, adaptadas a fotoperiodos largos (16/8), se observó que un fotoperiodo corto (12/12) tiende a acelerar el llenado de grano, reduciendo la duración de esta etapa (Figura 1). Esto sugiere que el reducir las horas de exposición a la luz induce a las plantas a completar su ciclo más rápidamente, como una respuesta adaptativa para asegurar la reproducción en condiciones menos favorables (Thomas & Vince, 1996). Esta respuesta está asociada a la sensibilidad innata de las plantas al fotoperiodo, el cual actúa como un indicador de la época del año, permitiéndoles sincronizar sus eventos de desarrollo con las condiciones ambientales específicas (Jackson, 2008). Este efecto se ha documentado en otras plantas adaptadas a los fotoperiodos largos del verano europeo, como el trigo y la cebada (Ritchie et al., 1998; Miralles et al., 2003). Estos cereales, cuando se cultivan bajo condiciones de fotoperiodo corto, exhiben un desarrollo acelerado, priorizando la reproducción sobre el crecimiento como una estrategia de supervivencia (Ritchie et al., 1998).

En las variedades ecuatorianas, Tunkahuán y 3_Carchi, adaptadas a un fotoperiodo corto (12/12), se evidenció una influencia notable por el cambio de fotoperiodo, en donde el fotoperiodo del verano europeo (16/8), al que no se encuentran adaptadas, alargó significativamente el tiempo de crecimiento vegetativo, sin distinción de luces. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Bertero, donde se distinguió que el fotoperiodo largo (16 horas luz) tiene fuertes efectos en todas las etapas de reproducción de las plantas que tengan origen en el altiplano Andino o tropical (1999), especialmente porque se retrasa el inicio de la floración (Galdames, 2020). Este efecto, que alarga la etapa vegetativa de la quinoa por

exposición a un fotoperiodo largo se debe al aumento del filocrono, la tasa de aparición de hojas en el tallo principal de una planta (Bertero, 2000). El aumento del periodo vegetativo tiene fuertes consecuencias en las posteriores etapas fenológicas, ya que resulta en una etapa fotosintéticamente activa más larga (Pinto, 2012), causando un retraso en la senescencia y que las plantas no puedan completar su ciclo bajo este tratamiento.

Por otro lado, otro comportamiento que resalta en la fenología de Tunkahuán y 3_Carchi, es que al aplicar luz rojo lejano a su fotoperiodo normal (12/12), se favorece una transición más rápida entre la etapa vegetativa y de floración. Se ha observado que en cultivos cuya fenología está influenciada por la duración del período de luz, el fitocromo desempeña un papel fundamental al regular las respuestas de floración (Erwin & Warner, 2000). Este fotorreceptor controla el crecimiento por elongación y detecta la duración del fotoperiodo como una señal, en donde es su forma activa (PFR) la cual absorbe la luz rojo lejano a 730 nm (Craig et al., 2013). Por lo tanto, la luz rojo lejano actúa como un modulador eficaz de la respuesta fotoperiódica en la quinoa, ya que puede detectarse como una respuesta a la inminente competencia por la luz (Valladares et al., 2004).

4.2 Efecto del fotoperiodo y luz en el crecimiento

Las curvas de crecimiento de los 4 genotipos, observadas en la Figura 2, muestran un patrón general en el crecimiento de la quinoa, el cual tiende a estabilizarse al inicio de la etapa de llenado de grano. Este fenómeno sucede porque tras la aparición de la inflorescencia (panícula), la planta fija la producción de masa al grano (Pinto, 2012). De forma específica, las variedades europeas, Bastille y Atlas, mostraron una tendencia a completar su ciclo aceleradamente bajo el fotoperiodo corto (12/12), especialmente en luz blanca. Por otro lado, Tunkahuán y 3_Carchi en el fotoperiodo largo (16/8) se demoran más tiempo en completar su ciclo, causando que algunas plantas no finalicen el llenado de grano en los 210 días de

observación, especialmente en la luz rojo lejano. Este comportamiento diferencial entre genotipos europeos y ecuatorianos destaca la plasticidad de la quinoa y su alta adaptabilidad (Hinojosa et al., 2018). Investigaciones en fotoperiodo demuestran que la quinoa se adapta a una amplia gama de entornos (Bertero & Hall, 2000; Tejeda, 2008). Se ha encontrado que los cultivares de quinoa del altiplano andino necesitan días cortos para la optimización de su rendimiento (Bertero & Hall, 2000), mientras que cultivares en el sur de Chile, que tiene las 4 estaciones, lograron adaptarse a fotoperiodos más largos, por lo que incluso pueden ser cultivadas en Europa y Estados Unidos (Tejeda, 2008). Al considerar los dos tipos de luces, se observa que existe un patrón claro: el uso de luz rojo lejano tiende a extender el ciclo de desarrollo de la planta en comparación al de la luz blanca, en todos los casos (Figura 2). Se conoce que la luz sirve como una fuente de energía y también como una señal de información sobre el entorno para las plantas, especialmente cuando existe una relación entre luz roja/rojo lejano que indica una competencia inminente (Ma, 2017). Por lo tanto, el espectro de luz influye en el tiempo de maduración de la quinoa, donde la luz roja lejano (730 nm) promueve un crecimiento prolongado como respuesta a la baja calidad de la luz, actividad modulada por los fitocromos, que regulan el crecimiento (Wan & Sosebee, 1998).

Adicionalmente, en la Figura 3 se observó que el tipo de luz también está relacionado con las alturas finales alcanzadas por las plantas. En este caso, la luz rojo lejano estimuló el crecimiento de la quinoa en la mayoría de los genotipos, con excepción de las variedades ecuatorianas bajo su fotoperiodo normal. Este aumento de altura responde al síndrome de evitación de la sombra, donde las plantas alargan el tallo, reorientan las hojas y asignan más carbono al brote para optimizar la captación de luz (Campbell & Norman, 1998). En el caso de Tunkahuán y 3_Carchi bajo condiciones de luz rojo lejano y fotoperiodo corto (12/12) se observó que la altura alcanzada fue similar a la de su contraparte en luz blanca, ya que existe

una aceleración de la floración. Este resultado se da por la rápida transición fenológica hacia el llenado de grano, en donde la planta deja de crecer y redirige sus nutrientes a la producción de semillas (Pinto, 2012). Por otro lado, otro factor determinante para la altura final fue el fotoperiodo, en el cual, el fotoperiodo largo (16/8), resultó en una mayor actividad fotosintética y un mayor alargamiento de los tallos (Peralta et al., 2009). Estos resultados concuerdan con estudios en otras accesiones quinoa (“Amarilla”, “Durazno” y “Bear”) que utilizan al fotoperiodo como modulador de crecimiento, en donde el extender el largo del día aumenta también la altura de las plantas en condiciones semi controladas (Galdames, 2020) y en campo (Mendoza, 2012).

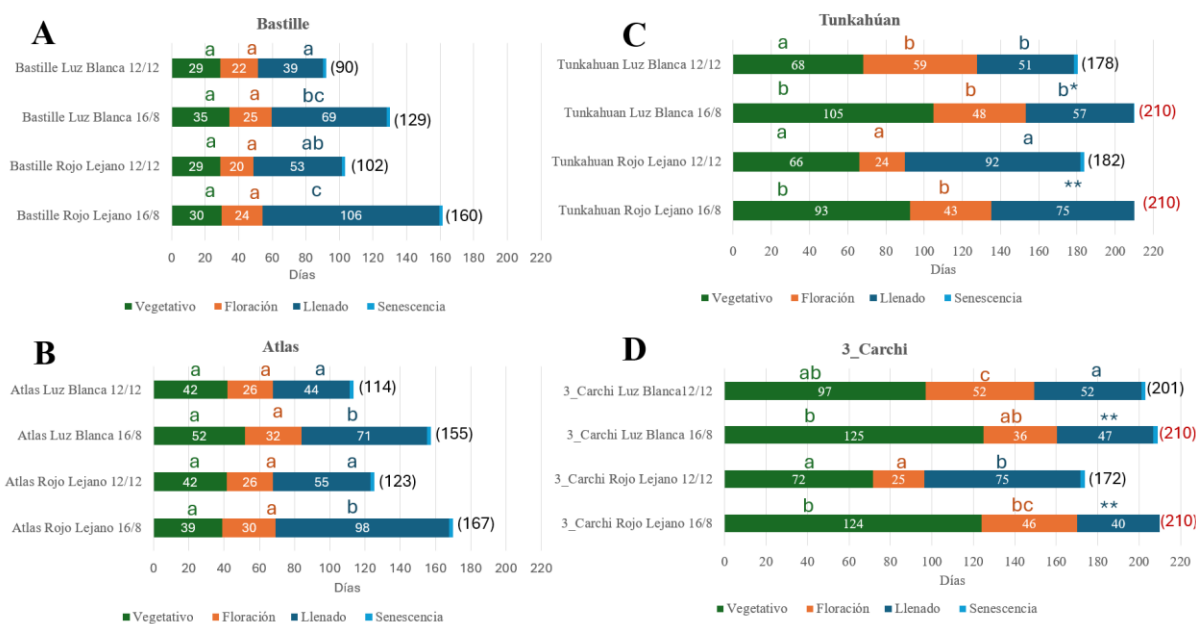
4.3 Influencia del fotoperiodo y luz en el rendimiento

Para el rendimiento, los resultados en la Figura 4 muestran que el fotoperiodo es el factor determinante en la producción de semillas. El fotoperiodo largo (16/8) favoreció mayores pesos de semilla total producida en las variedades europeas, mientras que el fotoperiodo corto (12/12) permitió la producción de semillas en las variedades ecuatorianas. El efecto más fuerte se observó en Tunkahuán y 3_Carchi, ya que la prolongación del estadio fenológico de llenado de grano bajo el fotoperiodo largo (16/8), causó que no existiera producción de semillas. Esto es consistente con los resultados reportados en otras variedades adaptadas a fotoperiodos cortos, como “Amarilla de Marangani”, en donde el aumento del fotoperiodo a 15 horas de luz provocó una inhibición del desarrollo del embrión, causando que las semillas nunca alcanzaran su etapa de madurez (Isobe et al, 2018). De igual manera, en otros cereales como la soya, también se ha reportado que los días largos durante el período posterior a la floración prolongaron la etapa de llenado de semillas (Kantolic & Slafer, 2005).

CONCLUSIONES

Esta investigación se centró en evaluar la influencia de dos fotoperiodos (12/12 y 16/8) y dos tipos de luces (luz blanca y rojo lejano) en el crecimiento, fenología y rendimiento de 4 genotipos distintos de quinoa: Bastille, Atlas, Tunkahuán y 3_Carchi. Los resultados muestran que el fotoperiodo es un factor determinante tanto para la fenología, como para el rendimiento de semillas en quinoa. Si se pretende trasladar genotipos de la región ecuatorial, como por ejemplo Tunkahuán y 3_Carchi, a Europa o América del Norte, es crucial tener en cuenta que el fotoperíodo largo puede retrasar el ciclo de vida de las plantas, alargar todas las etapas fenológicas y retrasar su producción de semilla, aunque favorece un mayor crecimiento en altura. Por el contrario, si se pretende trasladar genotipos europeos como Bastille y Atlas a condiciones ecuatoriales, el fotoperíodo corto acelerará su ciclo de vida, reduciendo tanto la altura de las plantas como su producción de semilla, por lo que es necesario tener ciertas consideraciones al trabajar con material vegetal sensible al fotoperiodo, especialmente si se busca maximizar el rendimiento. Por otro lado, se observó que la luz rojo lejano modula aspectos específicos, como la aceleración de la floración en los genotipos ecuatorianos bajo su fotoperiodo natural (12/12) y el aumento general del crecimiento en todos los genotipos. Como perspectivas futuras, se recomienda realizar estudios a nivel transcriptómico, con herramientas como RNA-seq que permitan evaluar la expresión diferencial de genes en distintos genotipos de quinoa sometidos a diferentes tratamientos de fotoperiodo. De esta manera se podrá identificar genes clave, y las rutas metabólicas involucradas en la respuesta de la quinoa al fotoperiodo. A partir de ello, se podrían desarrollar marcadores moleculares para el mejoramiento de variedades de quinoa insensibles al fotoperiodo, facilitando la transferencia exitosa de características entre regiones con diferentes duraciones del día.

FIGURAS



*Para este análisis se tomaron en cuenta 5/8 quinoas que acabaron la fase de llenado de grano

** Los genotipos ecuatorianos en 16/8 no llegaron a completar el ciclo ni producir semilla

Figura 1. Gráfico de barras apiladas del tiempo que le toma a Bastille (A), Atlas (B), Tunkahuán (C) y 3_Carchi (D), pasar de un estadio fenológico a otro en los distintos tratamientos de fotoperiodo (16/8 y 12/12) y luz (Luz Blanca y Rojo Lejano), específicamente delimitando por etapa vegetativa, floración, llenado de grano y senescencia.

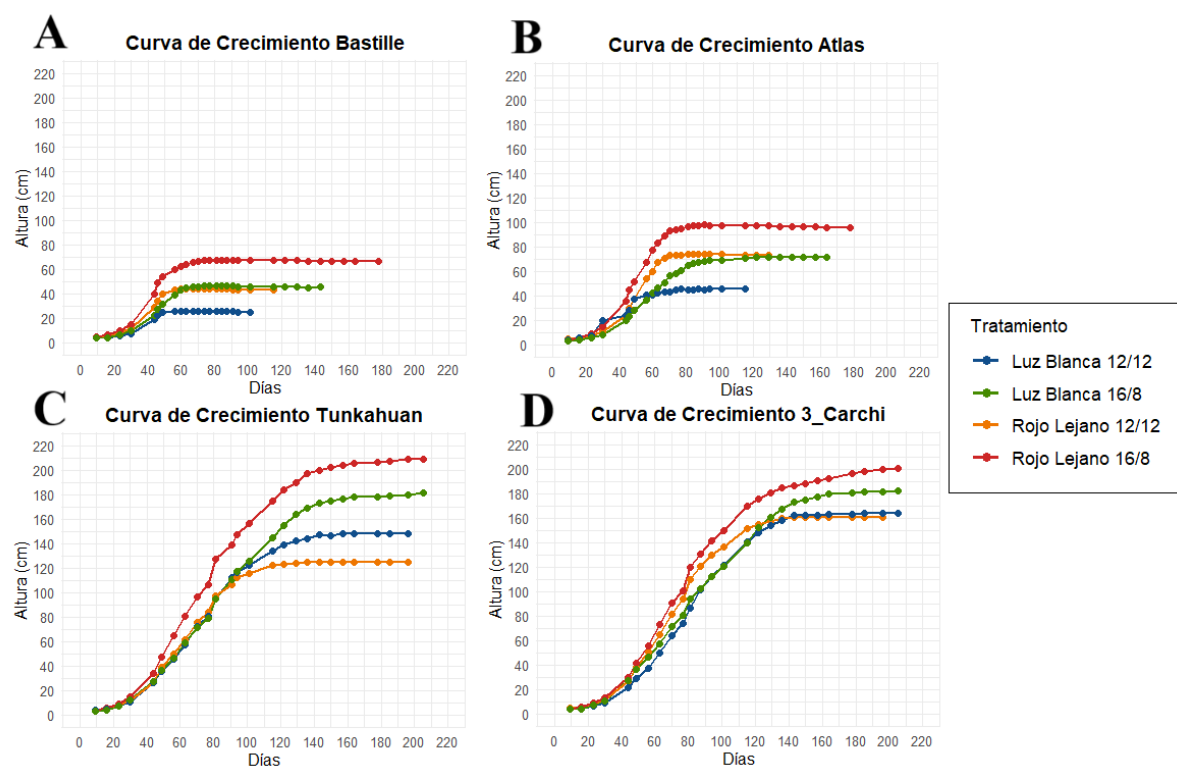


Figura 2. Curvas de crecimiento de los 4 genotipos: Bastille (A), Atlas (B), Tunkahuán (C) y 3_Carchi (D) a lo largo de los 210 días del experimento, con datos en cm tomados semanalmente.

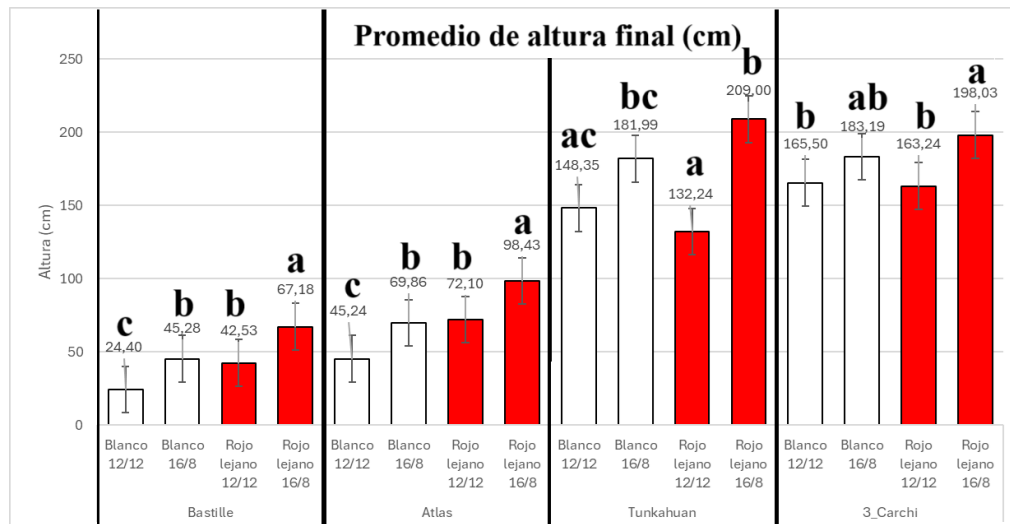


Figura 3. Gráfico de barras de la altura final de los 4 genotipos: Bastille (A), Atlas (B), Tunkahuán (C) y 3_Carchi (D) al momento de la cosecha en su respectivo tratamiento de luz y fotoperiodo.

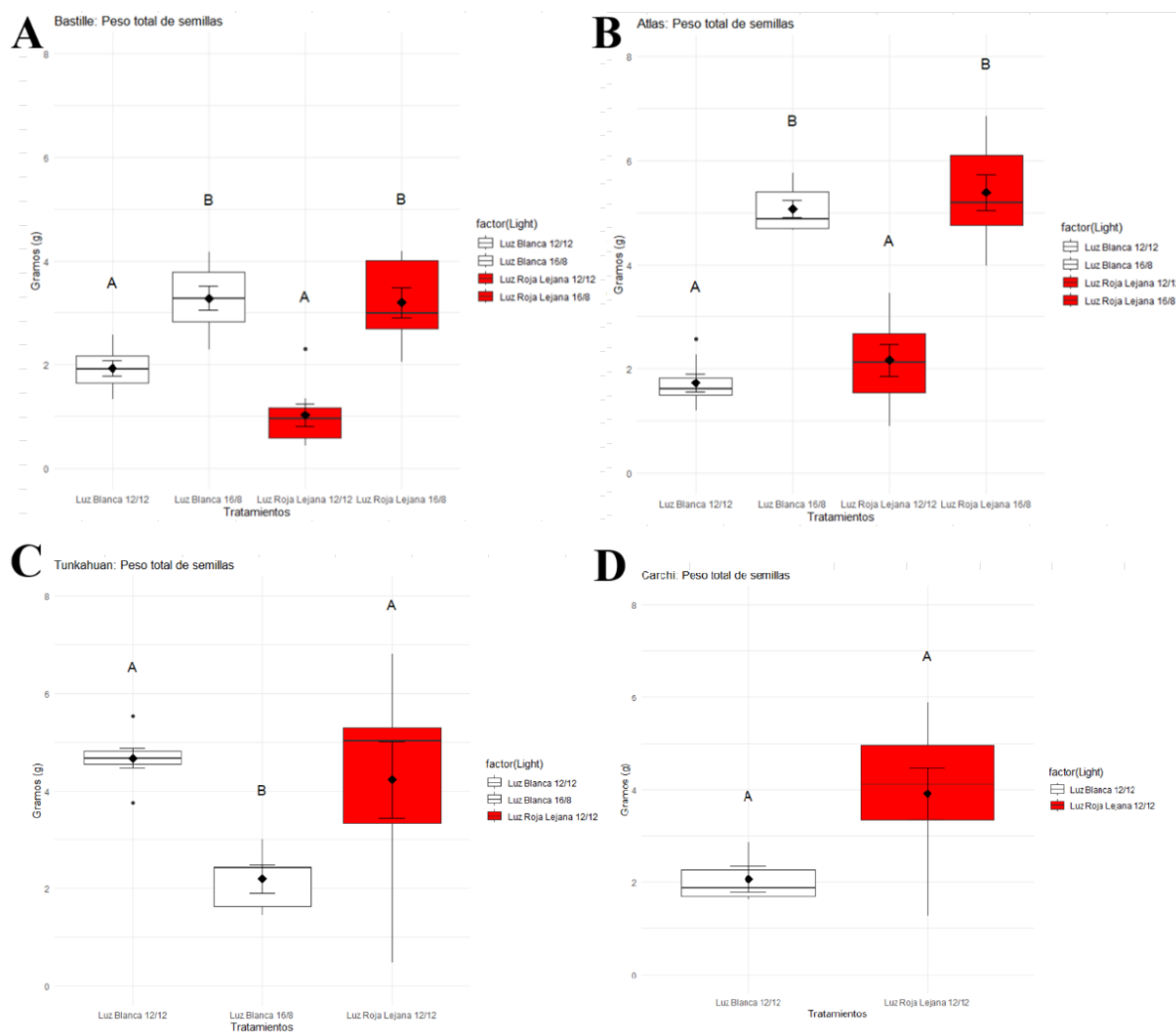


Figura 4. Diagramas de cajas del peso total de semillas correspondientes a los 4 genotipos: Bastille (A), Atlas (B), Tunkahuán (C) y 3_Carchi (D) en su respectivo tratamiento de luz y fotoperiodo.

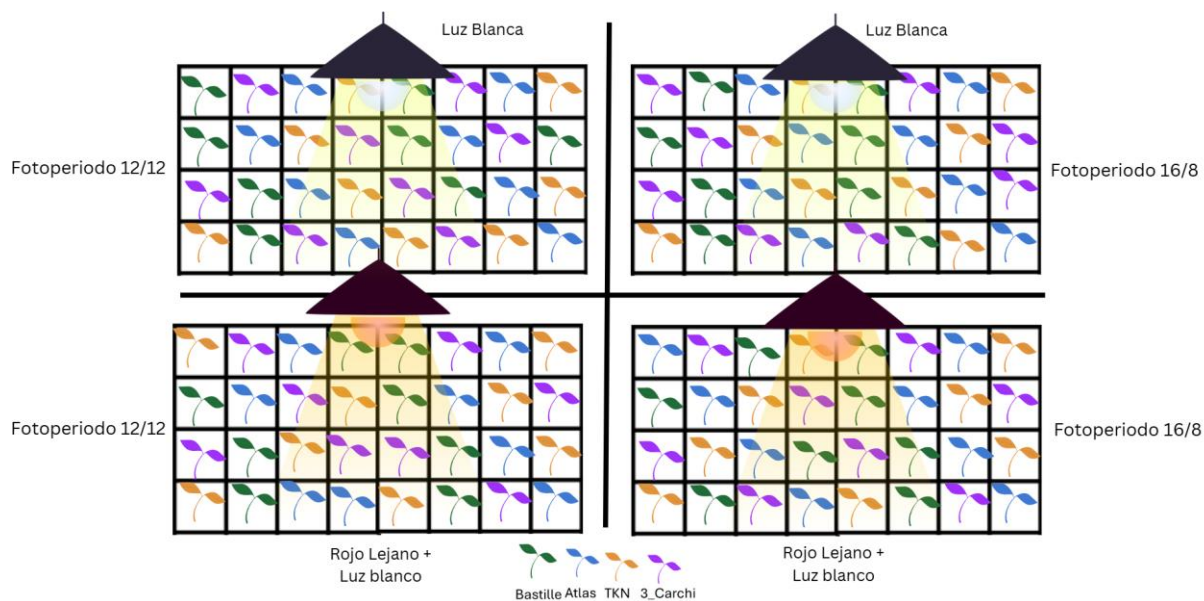
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abugoch, L. E. J. (2009). Chapter 1 Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Advances in Food and Nutrition Research*, 1–31. [https://doi.org/10.1016/s1043-4526\(09\)58001-1](https://doi.org/10.1016/s1043-4526(09)58001-1)
- Arendt, E. K., & Zannini, E. (2013). Quinoa. In *Elsevier eBooks* (pp. 409–438). <https://doi.org/10.1533/9780857098924.409>
- Bertero, D. & Hall, A., (2000). Response development processes to temperature and photoperiod in Quinoa. Available at: <http://www.rlc.fao.org/prior/segalim/prodalim/prodveg/cdrom/contenido/libro14/cap3.7.htm>.
- Bertero, D. (2003). Response of developmental processes to temperature and photoperiod in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Rev. Inv* 19: 87-97
- Bertero, H., King, R., & Hall, A. (1999). Photoperiod-sensitive development phases in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 60(3), 231–243. [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(98\)00128-2](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(98)00128-2)
- Campbell GS, Norman JM. (1998). An introduction to environmental biophysics, 2nd edn. New York: Springer.
- Curti, R., De La Vega, A., Andrade, A., Bramardi, S., & Bertero, H. (2016). Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in North West Argentina. *Field Crops Research*, 189, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.014>
- De Bock, P., Van Bockstaele, F., Muylle, H., Quataert, P., Vermeir, P., Eeckhout, M., & Cnops, G. (2021). Yield and nutritional characterization of thirteen quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) varieties grown in north-west europe—part i. *Plants*, 10(12), 2689.
- Erwin, J. E., & Warner, R. M. (2000). Determination of photoperiodic response group and effect of supplemental irradiance on flowering of several bedding plant species. In *IV International ISHS Symposium on Artificial Lighting 580* (pp. 95-99).
- Galdames, F. (2010). Efecto de diferentes Fotoperiodos en el crecimiento y desarrollo de plantas de quínoa, y cómo influye en la composición química de sus semillas. Mención fitotecnía. Universidad de Chile, Facultad de ciencias Agronómicas. Santiago, Chile.
- Hinojosa, L., González, J. A., Barrios-Masias, F. H., Fuentes, F., & Murphy, K. M. (2018). Quinoa abiotic stress responses: A review. *Plants*, 7(4), 106.

- Isobe, K., Sugiyama, H., Tamamushi, K., Shimizu, T., Kobashi, K., & Higo, M. (2018). Effects of day length on pollen tube elongation, embryo formation and seed development after flowering in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Seed Science Research*, 28(4), 272-276.
- Jackson, S. D. (2008). Plant responses to photoperiod. *New Phytologist*, 181(3), 517–531. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02681.x>
- Jaramillo Roman, V. (2021). Salt tolerance strategies of the ancient Andean crop quinoa. *Wageningen University: Wageningen, The Netherlands*.
- Ma, L. (2017). *Ecophysiology of the effect of red to far-red light ratio on selected weed and crop species* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Meisel, L., Urbina, D., & Pinto, M. (2011). Fotorreceptores y respuestas de plantas a señales lumínicas. *Fisiología vegetal. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile*, 18, 1-10.
- Mendoza Aguirre, M. S. (2012). Efecto del fotoperíodo sobre la duración de la fase vegetativa en tres accesiones chilenas de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.).
- Miralles, D. J., Slafer, G. A., Richards, R. A., & Rawson, H. M. (2003). Quantitative developmental response to the length of exposure to long photoperiod in wheat and barley. *The Journal of Agricultural Science*, 141(2), 159-167.
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (8. ed). Wiley
- Osnato, M., Cota, I., Nebhnani, P., Cereijo, U., & Pelaz, S. (2022). PhotoPeriod Control of plant growth: Flowering Time Genes Beyond flowering. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.805635>
- Peralta, E., Murillo, A., Mazón, N., Villacrés, E., & Rivera, M. (2009). Catálogo de variedades mejoradas de granos andinos: Chocho, quinua y Amaranto, para la Sierra de Ecuador.
- Pinto, M. (2012). Aspectos de la fisiología del cultivo de la quínoa. *El cultivo de la quínoa en Chile*, 33.
- Präger, A., Munz, S., Nkebiwe, P., Mast, B., & Graeff-Hönninger, S. (2018). Yield and Quality Characteristics of Different Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Cultivars

- Grown under Field Conditions in Southwestern Germany. *Agronomy*, 8(10), 197.
<https://doi.org/10.3390/agronomy8100197>
- Rojas, W., Alandia, G., Irigoyen, J., Blajos, J., & Santivañez, T. (2011). La Quinoa: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. *Oficina Regional Para America Latina y El Caribe, FAO*, 37, 66.
- Sanchez-Olate, M., Valenzuela, J. Z., Rios, D., Pereira, G., & Escobar, R. (2003). Efecto del fotoperíodo en el desarrollo de plantas de *Eucalyptus globulus* Labill. ssp. *globulus* cultivadas en vivero. *Bosque (Valdivia)*, 24(2). <https://doi.org/10.4067/s0717-92002003000200003>
- Stephen, J. D. (2009). Plant responses to photoperiod. *New Phytologist*, 181(3), 517-531.
- Tejeda J. C. (2008). Efecto del fotoperiodo sobre la producción de semillas de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Tesis M. Sc. Univ.de Chile, 30p
- Thomas, B., & Vince-Prue, D. (1996). *Photoperiodism in plants*. Elsevier.
- Valladares, F., Aranda, I., & Sánchez-Gómez, D. (2004). La luz como factor ecológico y evolutivo para las plantas y su interacción con el agua. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, 335-369.
- Vilcacundo, R., & Hernández-Ledesma, B. (2016). Nutritional and biological value of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Current Opinion in Food Science*, 14, 1–6.
<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2016.11.007>
- Wan, C., & Sosebee, R. E. (1998). Tillering responses to red:far-red light ratio during different phenological stages in *Eragrostis curvula*. *Environmental and Experimental Botany*, 40(3), 247–254. [https://doi.org/10.1016/s0098-8472\(98\)00044-6](https://doi.org/10.1016/s0098-8472(98)00044-6)

ANEXO 1. DISEÑO EXPERIMENTAL SPLIT-PLOT ROW-COLUMN.



Descripción: Diseño experimental de parcelas divididas, en la parcela principal se evaluó 2 fotoperiodos (12/12 y 16/8), dentro de estas existió una segunda división para evaluar 2 tipos de luz (blanca y rojo lejano), conformando 4 tratamientos. Cada tratamiento incluyó 8 réplicas de 4 genotipos, con distribución aleatoria, sumando un total de 128 plantas en el estudio

ANEXO 2. AGRUPACIÓN DE LOS CAMBIOS FENOLÓGICOS EN LA QUINOA.

						
1. BF	2. PLN	3. SVP	4. SL	5. SH	6. SD	7. SENE
Vegetativo	Floración		Llenado de grano			Senescencia

Descripción: Se presentan las 7 etapas fenológicas de la quinoa utilizado para caracterizar los cambios fisiológicos: (1) Aparición del botón floral, (2) Inicio de producción de polen (3) Aparición de semillas verdes, (4) Semilla Lechosa, (5) Grano Grueso, (6) Semilla Dura, (7) Senescencia.