



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Agronomía

Determinación del periodo crítico para el exceso hídrico y su influencia sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo condiciones controladas

Trabajo de Integración Curricular,
previo a la obtención del título de
Ingeniera Agrónoma

AUTORA:

Katty Carolina Loja Zhigui

DIRECTOR:

Dr. Santiago Cristóbal Vásquez Matute, PhD.

Loja – Ecuador

2023

Certificación

Loja, 15 de agosto de 2023

Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Determinación del periodo crítico para el exceso hídrico y su influencia sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo condiciones controladas**, previo a la obtención del título de **Ingeniera Agrónoma**, de la autoría de la estudiante **Katty Carolina Loja Zhigui**, con **cédula de identidad Nro. 1150111647**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

 firmado electrónicamente por:
**SANTIAGO
CRISTOBAL
VASQUEZ MATUTE**

Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Katty Carolina Loja Zhigui**, declaro ser autora del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula de identidad: 1150111647

Fecha: Loja, 23 de noviembre de 2023

Correo electrónico: katty.loja@unl.edu.ec

Teléfono: 0967418267

Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.

Yo, **Katty Carolina Loja Zhigui**, declaro ser autora del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Determinación del periodo crítico para el exceso hídrico y su influencia sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo condiciones controladas**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con los cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja a los veintitrés días del mes de noviembre de dos mil veintitrés.

Firma:



Autora: Katty Carolina Loja Zhigui

Cédula de identidad: 1150111647

Dirección: Loja-Saraguro-Manú

Correo electrónico: katty.loja@unl.edu.ec

Teléfono: 0967418267

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Integración Curricular:

Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute PhD

Dedicatoria

El presente Trabajo de integración curricular primeramente se lo dedico a Dios, por bendecirme con salud y regalarme un nuevo día más de vida guiándome en todo este proceso para poder cumplir mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Carmen Zhigui, sus esfuerzos son impresionantes y tu amor para mí es invaluable sin ella no lo hubiese logrado, sus consejos me motivaron siempre para seguir adelante, brindándome su apoyo incondicional hasta en los peores momentos siendo mi pilar fundamental para no caer y seguir.

A mi segundo padre Elicio Zhigui tus enseñanzas y tus buenos valores se quedarán marcados en mi corazón, ya que a pocos meses de llegar el día de mi grado partiste al cielo, pero tus recuerdos siempre perdurarán en mí, fuiste el mejor padre que me regalo Dios y la vida.

A mi segunda madre Flora Saraguro y a mi tía Mery Zhigui quienes siempre me motivaron y estuvieron presente en todo momento dándome consejos positivos para seguir el camino correcto y así mismo confiando en que yo sí podía.

De manera especial, a quien tomó mi mano durante este proceso y estuvo a mi lado en los momentos más difíciles, motivándome para culminar la ejecución del Trabajo de Integración Curricular.

A mi hermano, tío(a)s, primo(a)s y a mi padre quienes con sus palabras de aliento no me dejaban rendir para que siguiera adelante y siempre sea perseverante.

Esto es para usted y por ustedes

Katty Carolina Loja Zhigui

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad Nacional de Loja, por permitirme iniciar y concluir mis estudios, a la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, por brindarme el escenario necesario para realizar el proyecto de investigación, especialmente a la carrera de agronomía la misma que con su personal docente, administrativo y de servicios, me compartieron sus conocimientos contribuyendo a mi desarrollo académico y personal.

A mi director de Trabajo de Integración Curricular por ser mi guía en todo este proceso al Ing. Santiago Vásquez, quien con sus conocimientos y orientación durante la evolución del presente trabajo fue posible su cumplimiento, a pesar de todos los obstáculos que se presentaron en la ejecución, supo apoyar brindando la confianza para llegar a instancias finales.

Agradezco infinitamente a Dios por bendecir cada paso que doy brindándome sabiduría para seguir el camino correcto.

Así mismo existieron muchas personas que se hicieron presentes durante todo este proceso académico, que a pesar de no ser familia me ayudaron con su apoyo incondicional y sabios consejos fue muy gratificante ya que estaban en los peores momentos.

A mi mamá y papa, hermano, abuelitos, tíos, y primos por su apoyo incondicional en las buenas, malas y peores situaciones que atravesé.

A mis compañeros amigos los cuales siempre me brindaron su apoyo, sin recibir nada a cambio gracias por todo el apoyo y por compartir algunos de los mejores momentos de mi vida académica.

Katty Carolina Loja Zhigui

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas	ix
Índice de figuras.....	x
Índice de anexos.....	xii
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstrac.....	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	7
4.1. Importancia económica y nutricional	7
4.2. Morfología del cultivo de quinua.....	7
4.3. Requerimientos edáficos y climáticos	8
4.4. Fenología del cultivo	8
4.5. Componentes del rendimiento	10
4.5.1. Número de granos	11
4.5.2. Peso de granos.....	11
4.6. Tolerancia de la quinua a los estreses.....	12
4.6.1. Salinidad.....	12
4.6.2. Sequía.....	12
4.6.3. Altas temperaturas.....	12
4.7. Exceso hídrico.....	13
4.7.1. Efectos del exceso hídrico.....	14
4.8. Movimiento del agua en el suelo	15
4.9. Antecedentes.....	16
5. Metodología	18
5.1. Ubicación del área de estudio	18
5.2. Metodología general	19

5.2.1. Medición de la temperatura y humedad ambiental	19
5.2.2. Tipo de investigación	19
5.2.3. Diseño experimental.....	20
3.2.4. Modelo estadístico.....	22
5.3. Metodología para cada objetivo.....	22
5.3.1. Metodología para el primer objetivo “Describir el crecimiento vegetativo del cultivo de quinua expuestas al exceso hídrico bajo condiciones controladas”.....	2
5.3.2. Metodología para el segundo objetivo “Identificar la etapa fenológica más susceptible al exceso hídrico que afecta el rendimiento del cultivo de quinua”..	23
5.4. Análisis estadístico	25
6. Resultados	26
6.1. Resultados para el primero objetivo	26
6.1.1. Fenología del cultivo y condiciones climáticas	26
6.1.2. Altura de planta.....	28
6.1.3. Diámetro del tallo.....	29
6.1.4. Cobertura vegetal y contenido de clorofila	29
6.1.5. Índice de área foliar (IAF).....	31
6.2. Resultados para el segundo objetivo.....	31
6.2.3. Rendimiento, componentes del rendimiento e índice de cosecha.....	31
6.2.4. Análisis de correlación de las variables de estudio	34
7. Discusión	36
8. Conclusiones	43
9. Recomendaciones	44
10. Bibliografía	45
11. Anexos	54

Índice de tablas:

Tabla 1. Condiciones meteorológicas y edafoclimáticas para el desarrollo de la quinua.	8
Tabla 2. Tratamientos utilizados en el ensayo de exceso hídrico en quinua dependiendo de la etapa fenológica con sus respectivos códigos de la escala BBCH descrita por Sosa-Zuniga et al. (2017). Cada tratamiento implica el período en el que se aplicó el periodo de exceso hídrico de 12 días.	20
Tabla 3. Etapas de crecimiento fenológico de la quinua (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.) basadas en la escala BBCH.....	22
Tabla 5. Medias de rendimiento de grano y sus componentes e índice de cosecha en plantas de quinua bajo exceso hídrico en diferentes etapas fenológicas y el control. ...	33
Tabla 6. Correlación de las diferentes variables evaluadas en plantas de quinua bajo exceso hídrico	35

Índice de figuras:

- Figura 1.** Fenología del cultivo de quinua. 10
- Figura 2.** Ubicación del área de estudio donde se desarrolló el proyecto de investigación.
..... 18
- Figura 3.** Esquema de la implementación del experimento, donde los códigos de 2 dígitos indican los estados fenológicos según la escala BBCH y R nos indica el número de repetición..... 21
- Figura 4.** Representación del esquema del experimento. Se utilizó un balde para los tratamientos de exceso hídrico y un control que se encuentra en condiciones normales durante la aplicación de los tratamientos. 21
- Figura 5.** Fenología del cultivo de quinua para los diferentes tratamientos expuestos a exceso hídrico incluido el control, medidas según la escala BBCH en función de los DDS desde la emergencia hasta la senescencia de las plantas. Donde cada número sobre las barras significa el cogido de las etapas principales del cultivo. 26
- Figura 6.** Variables climáticas de temperatura máxima (azul), mínima (roja) y humedad relativa (HR) acumulada durante el ciclo del cultivo de quinua, triángulos rojos hacia abajo con los números indican los códigos de la escala fenológica BBCH representando las etapas principales en función de los DDS. 27
- Figura 7.** Altura de las plantas en diferentes días después de la siembra en función del periodo sometido a exceso hídrico, según la escala fenológica BBCH de la quinua. Las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje “x” hacen referencia al inicio del periodo de exceso hídrico periodo de exceso hídrico en cada etapa fenológica. La línea entrecortada vertical indica el inicio el inicio de antesis; (ns) efecto no significativo; (***) efecto significativo. 28
- Figura 8.** Diámetro del tallo de las plantas evaluadas a los 42 DDS hasta los 146 DDS en función del periodo sometido a exceso hídrico, según la escala BBCH del cultivo de quinua. Las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje” X” hacen referencia al inicio del periodo de exceso hídrico en cada etapa fenológica. La línea entrecortada vertical indica el inicio de antesis; (ns) efecto no significativo; (**) efecto significativo $p < 0,01$ 29
- Figura 9.** Cobertura vegetal (a) y contenido de clorofila (b) de las plantas evaluadas desde los 42 DDS hasta los 146 DDS en función del periodo sometido a exceso hídrico, según la escala BBCH del cultivo de quinua. Las líneas verticales de

colores ubicadas sobre el eje “X” hacen referencia al inicio del periodo de exceso hídrico en cada etapa fenológica. La línea vertical entrecortada indica el inicio de antesis; (ns) efecto no significativo; (**) efecto significativo $p < 0,01$; (***) efecto significativo $p < 0,001$ 30

Figura 10. Índice de área foliar de las plantas evaluadas desde los 41 hasta los 144 DDS en función del periodo sometido a exceso hídrico, según la escala BBCH del cultivo de quinua. Las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje “X” hacen referencia al inicio del periodo de exceso hídrico en cada etapa fenológica. La línea entrecortada vertical indica el inicio de antesis; (***) efecto significativo $p < 0,001$ 31

Figura 11. Efecto del exceso hídrico sobre el rendimiento aplicados en diferentes etapas fenológicas, donde cada DDS representa un tratamiento; la línea horizontal entrecortada hace referencia al control y la línea roja vertical indica el inicio de antesis. La línea azul horizontal representa el periodo crítico del rendimiento por exceso hídrico. 34

Índice de anexos:

Anexo 1. Descripción de los estados fenológicos de crecimiento de quinua (<i>Chenopodium quinua</i>) según la escala BBCH ampliada.....	54
Anexo 2. Altura de las plantas de quinua en (cm) a partir de los 42 DDS hasta los 146 DDS en función de periodos sometidos a exceso hídrico.....	56
Anexo 3. Diámetro del tallo de las plantas de quinua en (cm) a partir de los 42 DDS hasta los 146 DDS en función de periodos sometidos a exceso hídrico.....	56
Anexo 4. Cobertura vegetal de las plantas de quinua desde los 42 DDS hasta los 146 DDS en función del periodo sometido a exceso hídrico.....	57
Anexo 5. Contenido de clorofila de las plantas de quinua desde los 42 hasta los 156 DDS en función del periodo de exceso hídrico.....	57
Anexo 6. Índice de área foliar de las plantas de quinua evaluadas desde los 60 hasta los 144 DDS en función de periodos de exceso hídrico.....	58
Anexo 7. Aplicación de la fertilización en el cultivo.....	59
Anexo 8. Aparición de las primeras hojas verdaderas.....	59
Anexo 9. Siembra de 3 semillas de quinua por funda.....	59
Anexo 10. Preparación del sustrato a base de tierra, arena y compost.....	59
Anexo 11. Visita de director de tesis para explicar el funcionamiento de los equipos.....	59
Anexo 12. Aplicación de los diferentes tratamientos.....	59
Anexo 13. Medición del diámetro.....	60
Anexo 14. Medición de la altura.....	60
Anexo 15. Efecto del exceso hídrico en el primer tratamiento.....	60
Anexo 16. Aparición del botón floral.....	60
Anexo 17. Medición del contenido de clorofila con el SPAD.....	60
Anexo 18. Medición de la altura en los últimos tratamientos.....	60
Anexo 19. Efecto de las plantas impuestas a exceso hídrico en la etapa de mitad de anthesis.....	61
Anexo 20. Utilización de la cámara Go pro9 para medir IAF.....	61
Anexo 21. Observación de las plantas de quinua en etapa vegetativa.....	61
Anexo 22. Proporcionar agua a los baldes para mantener el agua igual a la superficie del sustrato.....	61
Anexo 23. Cosecha de las plantas de quinua.....	61
Anexo 24. Observación de las plantas de quinua en madurez de cosecha.....	61
Anexo 25. Colocación de las diferentes partes de la plata de quinua a fundas de papel.....	62

Anexo 26. Separación de las diferentes partes de la planta para llevar a la estufa.	62
Anexo 27. Colocación de las fundas con quinua en la estufa.	62
Anexo 28. Peso de las fundas de papel con quinua después de sacar de la estufa en la balanza gramera.	62
Anexo 29. Peso de 100 granos.	62
Anexo 30. Conteo de 100 granos.	62
Anexo 31. Limpieza de los granos mediante tamizadores.	63
Anexo 32. Peso del número total de granos.	63
Anexo 33. Colocación y obtención de los granos en la máquina limpiadora de quinua.	63
Anexo 34. Cálculos del plan de fertilización para el cultivo de quinua.	64
Anexo 35. Certificado de traducción del resumen.	68

1. Título

Determinación del periodo crítico para el exceso hídrico y su influencia sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo condiciones controladas

2. Resumen

El cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), se caracteriza por su alto contenido nutricional y adaptabilidad a diferentes agroecosistemas, por lo cual su consumo y producción se ha incrementado a nivel mundial. Chimborazo es la provincia con mayor producción en Ecuador cosechando 1 728 ha. Sin embargo, el cultivo se encuentra limitado por factores bióticos y abióticos, entre ellos, la precipitación ocasionando que las plantas resulten inundadas, el momento y duración del exceso hídrico determina la magnitud del daño y el impacto en la producción. En el presente estudio se evaluó el efecto del exceso hídrico con un periodo de 12 días en las fases fenológicas vegetativas y reproductivas, posteriormente estuvieron sin riego 16 días en las etapas de crecimiento y 7 días en las etapas reproductivas evaluando variables de crecimiento, fenología, y rendimiento, esto se realizó con la finalidad de identificar la etapa más susceptible al exceso hídrico en todas las variables. La fenología en condiciones normales duró 180 días, los tratamientos antes de anthesis alargaron su duración con 23 días más y los tratamientos después de anthesis acortaron su duración 21 días; para la variable altura en las primeras fechas la etapa BBCH 25 (5 brotes laterales) fue la más afectada pero, conforme avanzó el desarrollo del cultivo estas se recuperaron, sin embargo, no alcanzó valores iguales al control; en cuanto a la cobertura vegetal, contenido de clorofila e índice de área foliar (IAF) si existió efecto del exceso hídrico en todos los tratamientos aplicados debido a que, al finalizar cada tratamiento las plantas presentaron clorosis y amarillamiento en las hojas; seguidamente, en cuanto al rendimiento el control obtuvo 123,28 g maceta⁻¹ encontrando que la etapas más susceptible fue mitad de anthesis la misma que presentó 22,44 g maceta⁻¹, donde el número de granos fue el componente que explicó la mayor parte de esta variación, encontrando que el control presentó 39 431 granos maceta⁻¹ y mitad de anthesis que fue más afectada presentó 8 683 granos maceta⁻¹, así mismo, en cuanto a la biomasa fue más afectada en inicio de anthesis la misma que presentó 116,37 g maceta⁻¹ y el control presentó 282,09 g maceta⁻¹ explicando de esta manera que el índice de cosecha fue menor en mitad de anthesis con 0,14 y el control tiene 0,44 esto debido a las disminuciones de la biomasa y el rendimiento.

Palabras clave: Exceso hídrico, etapas vegetativas, etapas reproductivas, rendimiento.

Abstrac

The cultivation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) is characterized by its high nutritional content and adaptability to different agroecosystems, which is why its consumption and production has increased worldwide. Chimborazo is the province with the highest production in Ecuador, harvesting 1,728 hectares. However, the crop is limited by biotic and abiotic factors, among them, precipitation causing the plants to be flooded, the moment and duration of excess water determines the magnitude of the damage and the impact on production. In the present study, the effect of excess water was evaluated with a period of 12 days in the vegetative and reproductive phenological phases, subsequently they were without irrigation for 16 days in the growth stages and 7 days in the reproductive stages, evaluating growth variables, phenology and yield. This was carried out with the purpose of identifying the stage most susceptible to excess water in all variables. The phenology under normal conditions lasted 180 days, the treatments before anthesis lengthened its duration by 23 more days and the treatments after anthesis shortened its duration by 21 days; for the variable height in the first dates, the BBCH 25 stage (5 lateral shoots) was the most affected but, as the development of the crop progressed, these recovered, however, it did not reach values equal to the control; regarding plant cover, chlorophyll content and leaf area index (LAI), there was an effect of excess water in all the applied treatments because, at the end of each treatment, the plants presented chlorosis and yellowing of the leaves, next, in terms of yield, the control obtained 123,28 g pot⁻¹, finding that the most susceptible stage was the half anthesis, as well as 22,44 g pot⁻¹, where the number of grains was the component that explained most of this variation, finding that the control presented 39,431 grains pot⁻¹, likewise, in terms of biomass it was most affected presented 8,683 grains pot⁻¹, likewise, in terms of biomass it was most affected at the beginning of anthesis, just as it presented 116,37 g pot⁻¹, and the control presented 282,09 g pot⁻¹, thus explaining that the harvest index was lower in the middle of anthesis with 0,14 and the control has 0,44, this due to the decreases in biomass and yield.

Keywords: Excess water, vegetative stages, reproductive stages, yield

3. Introducción

El cultivo de quinua es originario de América del Sur, siendo sus principales países productores Perú, Bolivia y Ecuador (Laurente & Mamani, 2020). En los últimos años el cultivo ha adquirido mayor importancia debido a su valor nutritivo y adaptabilidad a diferentes agroecosistemas, esto ha permitido que su producción y consumo se incrementen a nivel mundial, en el año 2018 llegó a producir alrededor de 158 920 t en 178 313 ha cultivadas (Villavicencio, 2018; Alandia *et al.*, 2020). Es reconocida por ser un alimento que posee alto contenido de proteínas con un excelente perfil de aminoácidos, rico en nutrientes como lípidos, fibra, vitaminas y minerales, es potencialmente beneficioso para la salud y no contiene gluten, por lo que es apta para personas que tienen que seguir una dieta sin gluten (J. Campos *et al.*, 2022).

En Ecuador las zonas agrícolas donde existe mayor producción corresponden a las provincias de la sierra, como: Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Chimborazo, y en menor cantidad la provincia de Loja (Landy & Lazo, 2018). En el año 2020 la superficie sembrada del cultivo de quinua a nivel nacional fue de 2 940 ha de las cuales se cosecharon 2 390 ha lo cual representa 1 481 t principalmente en la región Interandina, Chimborazo es la provincia con mayor producción de quinua sembrando 2 153 ha y cosechando 1 728 ha (INEC, 2020).

La quinua se encuentra limitada por factores bióticos y abióticos, uno de ellos es la cantidad de precipitación y la liberación del agua hacia las plantas que generalmente resultan inundadas, existen pocos estudios que asocien la intensidad del estrés hídrico con la reducción del rendimiento (Garrido *et al.*, 2013; Montesinos, 2016). El momento y duración que ocurre el exceso hídrico determinan la magnitud del daño y su impacto en la producción, así mismo, presenta diferencias entre cultivares y en su capacidad de adaptarse a este tipo de estrés, el mismo que provoca muchos daños en el desarrollo, distorsiones en el crecimiento de la planta y reduce el crecimiento de brotes y raíces, factores que en mayor o menor medida determinan pérdidas en el rendimiento, dependiendo de la etapa de crecimiento, la profundidad del nivel de agua y condiciones externas como la temperatura ambiental. Otros factores como suelos de textura pesada (arcillosos), pendientes bajas y suelos mal drenados también contribuyen a las inundaciones, incluso en regiones secas (Ghobadi *et al.*, 2017; INIAP, 2014)

En la zona sur del país el agua y la tierra son fundamentales para el desarrollo agrícola, sin embargo, estos recursos sufren degradación natural debido a procesos de erosión, sequías e inundaciones; en la provincia de Loja los suelos se caracterizan por ser arcillosos, los cuales reducen la infiltración durante un evento de precipitación, los mismo que pueden ocasionar pérdidas en el rendimiento de los cultivos (Fries *et al.*, 2020). El número de episodios de exceso hídrico ha ido en aumento a nivel mundial como resultado principalmente de lluvias más intensas e impredecibles, en muchos casos asociadas con el cambio climático (Pereira *et al.*, 2021). El exceso hídrico del suelo y la inmersión más profunda causan estrés en las plantas, como una de las principales limitaciones abióticas en el desarrollo de cultivos agrícolas, las condiciones de inundación prolongada pueden resultar en pérdidas de cultivos mayores al 10 % y en casos severos mayores al 40 % (Aldana *et al.*, 2014).

Hasta la actualidad no existen estudios reportados que hayan cuantificado el impacto del exceso hídrico en el crecimiento del cultivo de quinua a nivel nacional, solo existe un estudio publicado internacionalmente sobre la fisiología y crecimiento ante el exceso hídrico en quinua sin considerar el rendimiento (González *et al.*, 2009). Ante el desafío de elevar la producción de alimentos de calidad para alimentar a la población en un contexto de cambio climático, la quinua aparece como una alternativa para países que sufren inseguridad alimentaria (Huisa & Cairampoma, 2020). Por tal motivo, la presente propuesta busca estudiar los factores que limitan su producción, particularmente identificando la etapa fenológica que es más afectada por exceso de agua.

La presente investigación está relacionada con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 1 y 2 denominados “fin a la pobreza” y “hambre cero”, mismos que aspiran brindar una alimentación sana, nutritiva y suficiente. Dentro de las líneas de investigación, el proyecto de integración curricular está vinculado con la línea de investigación de la Universidad Nacional de Loja llamada “Sistemas agropecuarios sostenibles para la soberanía alimentaria”, y además pertenece a la línea de la carrera de ingeniería agronómica llamada “Tecnologías para la producción y posproducción agrícola sostenible”.

Por lo tanto, la presente investigación busca responder la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la etapa fenológica más susceptible al exceso hídrico, y cómo afecta al crecimiento y rendimiento de quinua bajo condiciones controladas?

Objetivo General

- Identificar el periodo crítico para el exceso hídrico y su influencia sobre el crecimiento y rendimiento en quinua bajo condiciones controladas.

Objetivos Específicos

- Describir el crecimiento vegetativo del cultivo de quinua expuestas al exceso hídrico bajo condiciones controladas.
- Identificar la etapa fenológica más susceptible al exceso hídrico que afecta el rendimiento del cultivo de quinua.

4. Marco teórico

4.1. Importancia económica y nutricional

En los países andinos, el cultivo de la quinua puede jugar un papel importante en la economía futura mediante nuevos mercados de exportación y seguridad alimentaria local (Vidueiros *et al.*, 2015). Ecuador fue considerado el tercer productor de quinua a nivel mundial debido a que, en el año 2015 el área total de producción alcanzó las 7 800 ha con un récord de 12 000 t (Hinojosa *et al.*, 2021).

Según el Sistema de Información Pública Agropecuaria Nacional del MAG (Sipa, 2021) la quinua en la provincia de Chimborazo representa un ingreso bruto de aproximadamente USD 2 000 000 cada año, actualmente “INIAP Tunkahuan” es la variedad más sembrada entre los agricultores, ocupando el 66 % del área total de quinua con una productividad promedio de 1300 kg ha⁻¹ (Hinojosa *et al.*, 2021).

La importancia de la quinua en la alimentación se destaca no solo en los países en desarrollo, sino también en los países desarrollados, debido a su calidad proteica en cuanto al contenido de aminoácidos esenciales, es reconocida a nivel mundial como un grano sumamente nutritivo. El valor nutricional superior se basa en su perfil de minerales, fibra y composición equilibrada de micronutrientes (antioxidantes y vitaminas), los análisis de composición nutricional de las semillas revelaron concentraciones de proteína que oscilaban entre el 12 y el 23 % y un contenido de grasa entre el 2 y el 10 % (Vidueiros *et al.*, 2015; Angeli *et al.*, 2020)

4.2. Morfología del cultivo de quinua

La quinua es una planta dicotiledónea anual, generalmente herbácea, que puede alcanzar una altura de 2 a 3 m, las plantas pueden venir en una variedad de colores, desde verde, morado hasta rojo y colores intermedios (FAO, 2011).

El tallo principal puede ser ramificado o no, es de sección circular en la zona cercana a la raíz, se transforma en angular a la altura del follaje; es erecto, glabro, ramificados con o sin espinas; las hojas basales son grandes y pueden tener forma romboidal o triangular, las hojas superiores alrededor de la panoja son lanceoladas, de color verde a rojo, dentadas en los bordes, y su superficie es granulosa y parece estar cubierta de arenilla (Aguirre, 2018; FAO, 2011). La raíz es de tipo pivotante, consta de una raíz principal de la cual salen un gran número de raíces laterales muy ramificadas, la longitud de las raíces es variable de 0,8

a 1,5 m, las flores son sésiles o pediceladas, están agrupadas en glomérulos, la posición del glomérulo en la inflorescencia y la posición de las flores dentro del glomérulo determinan el tamaño y el número de los granos o frutos, son hermafroditas; la panoja tiene una longitud variable de 15 – 70 cm, generalmente se encuentra en el ápice de la planta y ápice de las ramas, tiene un eje principal, ejes secundarios y ejes terciarios; la semilla presenta tres partes bien definidas que son: epispermo, embrión y perisperma (FAO, 2016).

4.3. Requerimientos edáficos y climáticos

En la tabla 1 se presentan los requerimientos edáficos y climáticos para lograr un buen desarrollo del cultivo de quinua durante todo su ciclo de cultivo.

Tabla 1. Condiciones meteorológicas y edafoclimáticas para el desarrollo de la quinua.

Componente	Característica del componente	Observaciones
Suelo	<ul style="list-style-type: none"> Buen drenaje Textura franca-arenosa pH neutro 	La quinua presenta susceptibilidad a la alta humedad sobre todo en los primeros estadios
Clima	Diversas zonas agroecológicas	Genotipos adaptados a diferentes climas.
Riego	<ul style="list-style-type: none"> ¾ de la capacidad de campo 250 – 500 mm de lluvia anual 	Se ha observado el mejor desarrollo a este nivel de humedad.
Humedad relativa	<ul style="list-style-type: none"> 40 – 100 % 	Susceptibilidad a Mildiu en condiciones de alta humedad relativa
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> 15 – 20°C 	
Fotoperiodo	Diversos regímenes de luz	Genotipos adaptados a días cortos, largos e independientes al fotoperiodo
Altura	<ul style="list-style-type: none"> 0 – 4 000 msnm 	Se ha observado el mayor potencial productivo a nivel del mar (6 000 kg/ha)

Fuente: (Campos, 2018).

4.4. Fenología del cultivo

El ciclo de vida de la quinua es de aproximadamente 6 meses, lo que determina la época de siembra y cosecha (Figura 1). El cultivo consta de 10 etapas principales de crecimiento, los estados fenológicos del cultivo de quinua están basados en la escala de los autores Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemische Industrie BBCH, y todas las etapas fueron descritas por Sosa-Zuniga *et al.* (2017) (Anexo 1).

- **Etapas de crecimiento principal 1: desarrollo de la hoja**

Describe la aparición de las hojas fotosintéticas en el brote principal. Las hojas emergen en pares en la quinua, por lo que se considera que un par de hojas es visible cuando los dos limbos de la hoja se separan uno del otro. Esta etapa inicia cuando se separan los

cotiledones entre ellos (estadio 10) mientras que la aparición de las hojas fotosintéticas en el brote principal determina la etapa de crecimiento secundaria. El primer par de hojas fotosintéticas visibles se codifica como estadio 11, seguido del estadio 12 y sucesivamente.

- **Etapa de crecimiento principal 2: formación de brotes laterales (tallos secundarios)**

Se caracteriza por la formación de brotes laterales. En la quinua, la aparición de brotes laterales puede comenzar antes o después de la aparición de la inflorescencia, según el genotipo, por esta razón, la formación de brotes laterales se puede incluir junto con las siguientes etapas principales de crecimiento utilizando un trazo diagonal: un brote lateral se consideró visible cuando presenta un cm o más de longitud, el primer brote lateral se codificó como etapa 21, seguido por el segundo brote lateral codificado como etapa 22 en adelante.

- **Etapa de crecimiento principal 5: emergencia de la inflorescencia**

Describe cualitativamente el desarrollo de la inflorescencia en el brote principal, la emergencia de la inflorescencia ocurrió antes del final de la etapa de desarrollo de la hoja en el brote principal (etapa 1). Al principio, los botones de la inflorescencia estaban cubiertos por hojas jóvenes y no eran visibles (etapa 50), después de la elongación de las hojas la inflorescencia se hace visible desde arriba (etapa 51). Esta etapa finaliza cuando la inflorescencia queda expuesta sin hojas, aunque todas sus flores siguen cerradas (etapa 59).

- **Etapa de crecimiento principal 6: floración**

Describe el desarrollo de las flores dentro de la inflorescencia principal, la floración comienza cuando se extruyen las primeras anteras (etapa 60). A la antesis siguió el final temprano de la floración, que comenzó con las primeras anteras senescentes de las flores principales de la inflorescencia (etapa 67). En esta etapa, el color de la inflorescencia cambió dependiendo del genotipo, en el que el color del perigonio cambió a medida que avanzaba la floración; cuando todas las anteras visibles de la inflorescencia principal senescen, se consideró que la antesis estaba completa (etapa 69).

- **Etapa de crecimiento principal 7: desarrollo de la fruta**

Describe el desarrollo del fruto en el tallo principal. El desarrollo se inició con el cuajado (etapa 70), que se definió como el engrosamiento de los ovarios y la presentación de los primeros granos visibles.

- **Etapa de crecimiento principal 8: maduración**

Describe la maduración de los granos durante el proceso de maduración, el contenido de agua en el aquenio varió, modificando su textura y cambiando el color del pericarpio, que pasó de verde a beige, rojo o negro; para medir la maduración (etapa 8), los criterios fueron que el grano se consideró lechoso (etapa 81), grueso (etapa 85) y maduro (etapa 89), el estado lechoso fue característico de granos con pericarpio verde que se trituraban fácilmente con las uñas liberando un contenido líquido de color blanco; los granos gruesos, por el contrario, tienen un contenido pastoso blanco cuando se trituran y sus pericarpios son de color verde, beige, rojo o negro.

- **Etapa de crecimiento principal 9: senescencia**

Describe la senescencia de la planta después de la maduración de la fruta, la senescencia comenzó en las hojas basales (etapa 91) y continuó hacia arriba, pero el tallo permaneció verde (etapa 93). Luego, las hojas restantes murieron y el tallo cambió de amarillo a marrón (etapa 95). Finalmente, toda la planta estaba muerta y seca (etapa 97), y luego se cosechó el producto (etapa 99).

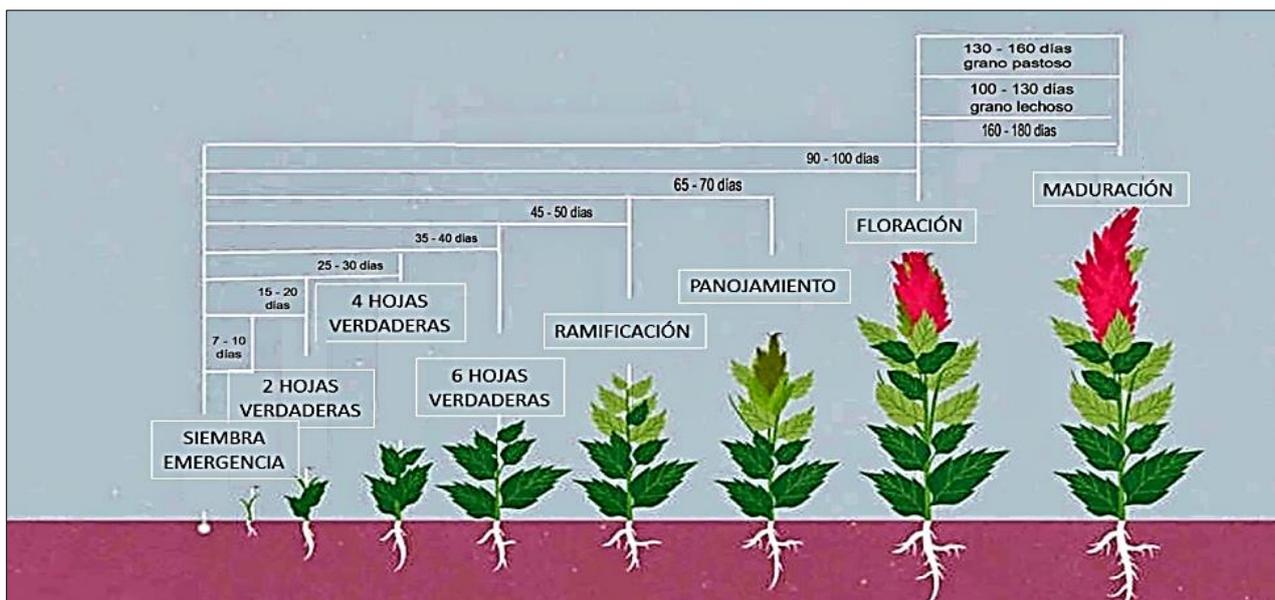


Figura 1. Fenología del cultivo de quinua (Leiva *et al.*, 2018).

4.5. Componentes del rendimiento

El rendimiento de grano de los cereales es el resultado del desarrollo y crecimiento de sus componentes durante el ciclo de vida del cultivo, la necesidad de comprender las relaciones entre los componentes del rendimiento es obvia porque imponen restricciones en

la forma de una planta y con frecuencia son barreras para mejorar el rendimiento (Sadras & Slafer, 2012).

En la mayoría de los casos, los componentes del rendimiento que se toman en cuenta son: el número de granos por unidad de área (NG) y el peso de grano individual; NG a menudo se divide aún más en sus componentes: número de espiga por unidad de área y granos por espiga. A veces también se consideran otros componentes, como las espiguillas por espiga y los granos por espiguilla o el número de macollos (Benincasa *et al.*, 2022).

Sin embargo, el rendimiento de granos integra dos componentes principales: el número de granos por m² y el peso promedio de los granos, donde las variaciones de rendimiento en las especies de cultivos de granos generalmente están relacionadas con el número de granos mismo, los cuales se detallarán a continuación (Lesjak & Calderini, 2017).

4.5.1. Número de granos

La determinación de este componente es un proceso secuencial que se va generando a lo largo del ciclo del cultivo. En quinua este componente posee dos etapas: una etapa vegetativa en la cual se determina el número de plantas por unidad de superficie y el número de ramificaciones por planta, y una etapa reproductiva en la cual se determina el número de ramificaciones de panoja por planta y el número de granos por panoja; debido a que el número de granos se va fijando en distintas etapas específicas del ciclo del cultivo se determina que la magnitud del componente generado dependa de la relación fuente/destino en dicho momento, pues este determina la tasa de crecimiento en el cultivo, la generación y supervivencia del componente numérico (Villavicencio, 2018).

4.5.2. Peso de granos

El peso de grano es el último componente del rendimiento en fijarse, depende de la tasa de acumulación de materia seca del grano y del tiempo de llenado, y empieza luego de la fecundación. La evolución del peso de grano durante el periodo de llenado considera la dinámica de acumulación de materia seca, y comprende tres fases: la fase uno “lag” donde se produce la división celular acelerada y el incremento del peso es leve, la fase dos “crecimiento lineal” donde hay una gran acumulación de biomasa y se definen los componentes comerciales, y finalmente la fase tres “de estabilidad” donde ya no hay acumulación de biomasa y su peso se estabiliza, alcanzando su máximo peso seco (Villavicencio, 2018).

4.6. Tolerancia de la quinua a estreses

El estrés abiótico es la causa principal de las pérdidas de cultivos, lo que reduce los rendimientos en más del 50 % en todo el mundo, muchos de estos factores estresantes ocurren en combinaciones naturales. *Chenopodium quinoa* es un cultivo versátil con un potencial prometedor para satisfacer la demanda de alimentos, se considera resistente al cambio climático, sin embargo se encuentra limitada principalmente por diferentes tipos de estrés abióticos que afectan al cultivo (sequía, alta salinidad, exceso de calor, inundaciones, heladas e irradiación de luz ultravioleta UV-B, uno de los principales problemas que emanan de estos escenarios es la seguridad alimentaria, que está a punto de amplificarse progresivamente (Hinojosa *et al.*, 2018; Jaikishun *et al.*, 2019).

4.6.1. Salinidad

Aly *et al.* (2018) indicaron que la quinua podría ser tolerante a la sal en términos de producción de biomasa, se puede cultivar en condiciones salinas hasta un 40 % de salinidad del agua de mar, además, encontraron que la recuperación de la altura de la planta se observó a una concentración de 50 mm; así mismo, se debe tomar medidas para proteger el suelo contra la salinización. Sin embargo, otro estudio nos dice que el estrés por salinidad redujo significativamente el número de hojas en el tallo principal, el número de ramas en la planta, la longitud de la raíz, el peso seco de la raíz y el peso seco de los brotes (Long, 2016).

4.6.2. Sequía

El estrés por sequía afecta los aspectos morfológicos, fisiológicos y rasgos bioquímicos (Issa *et al.*, 2019). La quinua tiene una capacidad para crecer en suelos con deficiencia de agua debido a su bajo requerimiento de agua inherente. En la región andina, la sequía puede ocurrir de manera impredecible con episodios intermitentes y terminales que eventualmente pueden provocar daños en las semillas después de la siembra o en la etapa de plántula, la pérdida de cultivos y retraso en la cosecha. Otros mecanismos preventivos empleados por la quinua incluyen la elasticidad del tejido, el bajo potencial osmótico y la disminución del área foliar a través de la dehiscencia (Jaikishun *et al.*, 2019).

4.6.3. Altas temperaturas

El aumento de temperatura y los constantes cambios de clima inciden negativamente en el desarrollo de las plantas, lo que ha derivado en una situación alarmante para los diferentes cultivos de interés agrícola y alimentario. En el caso específico de la quinua, la investigación apunta a una pérdida significativa en la productividad del cultivo de granos

señalando diferencias según las altitudes de las áreas de producción y la disponibilidad de agua; la combinación de diferentes niveles de temperatura (8-18 °C y 20-25 °C) y con tres tipos de riego (riego completo, riego deficiente y riego de secado alterno) han indicado cambios en el desarrollo fisiológico de la quinua, generando variaciones en la producción de biomasa, rendimiento de grano y comportamiento fenológico (García-Parra *et al.*, 2020).

Según Hinojosa *et al.* (2018) se ha reconocido que el aumento de temperatura durante la fase de crecimiento de la quinua es considerado uno de los factores abióticos más relevantes de esta especie y las consecuencias se manifiestan mediante cambios en su crecimiento vegetativo y reproductivo, modificaciones en sus funciones fisiológicas y alteraciones en los parámetros productivos como rendimiento y calidad del cultivo.

4.7. Exceso hídrico

En la producción agrícola, los efectos climáticos normalmente se presentan con el establecimiento de las lluvias hasta el pleno desarrollo del cultivo en diferentes etapas fenológicas, en cuanto al exceso de agua en el suelo, la mayoría de las especies de plantas no pueden sobrevivir a la inmersión prolongada o al anegamiento del suelo. La sumersión completa de la planta por inundaciones también puede conducir a una baja disponibilidad de oxígeno en los órganos de la superficie, especialmente cuando la turbidez del agua limita la fotosíntesis, lo cual ocasiona señales metabólicas de varios tipos en respuesta a la disminución de los niveles de oxígeno que surge de la inmersión. En consecuencia, las plantas desarrollan estructuras anatómicas y morfológicas, como la formación de aerénquima y la producción de raíces adventicias; en cuanto a las respuestas de los nutrientes de las plantas al exceso de agua, generalmente difieren entre especies (Loreti *et al.*, 2016; Villa *et al.*, 2022).

Los principales síntomas de respuesta de las hojas al estrés por exceso hídrico son el rizado, amarillamiento, marchitamiento, la caída, la pudrición, etc. Tienen dos tipos de adaptación al estrés por anegamiento: una es aumentar el grosor, mientras que la otra es reducir el grosor, por lo tanto, algunas plantas adelgazan sus hojas o forman otras especiales para promover la capacidad de infiltración de CO₂. Tanto los factores estomáticos como los no estomáticos inhiben la fotosíntesis; para los factores estomáticos las señales químicas de las raíces se transfieren al suelo, forzando el cierre de los estomas de las hojas, lo cual reduce la tasa fotosintética al disminuir la capacidad de absorción del sustrato fotosintético CO₂ (J. Wu *et al.*, 2022).

Se considera que el suelo está saturado de agua cuando el exceso de agua satura los poros del suelo (con una capa muy delgada, o incluso sin ella, de agua en la superficie del suelo), lo que inhibe el intercambio de gases entre las raíces y la atmósfera, por lo tanto, el efecto negativo del encharcamiento en los cultivos es causado por la baja concentración de oxígeno en el suelo. Estas condiciones deficientes de oxígeno hacen que las raíces de las plantas pasen de una respiración aeróbica a una fermentación anaeróbica, lo que limita la producción de energía; el anegamiento también produce aumentos en la resistencia de los estomas, afectando la absorción de nutrientes y agua; como consecuencia, la tasa de crecimiento de los cultivos disminuye y las plantas se marchitan (de San Celedonio *et al.*, 2014)

4.7.1. Efectos del exceso hídrico

➤ Efectos en el suelo

El principal efecto que tiene el anegamiento sobre el comportamiento del suelo es la disminución de la concentración de oxígeno y un aumento del dióxido de carbono (CO₂) producto de la respiración biológica y el impedimento al intercambio de gases, dado que la difusión de los gases en agua es 10 veces menor que en aire. Bajo esta condición se genera el fenómeno conocido como hipoxia (Romero *et al.*, 2016).

➤ Efectos en rendimiento y crecimiento de cultivos

En el trigo, el encharcamiento reduce el alargamiento de la hoja, la fotosíntesis, el número de granos por espiga y el rendimiento final, puede reducir el rendimiento del trigo de invierno entre un 32 % y un 94 % durante 20 días, y pueden disminuir en un 44,7 % el número de granos por espiga, 33,9 % en el número de espigas por planta y 9,1 % en el peso de mil granos (Ghobadi *et al.*, 2017).

Los daños por anegamiento en el sistema radicular limitan la capacidad de absorber agua y nutrientes, a su vez reduce la biomasa, la acumulación y removilización de carbohidratos en los granos. En general el daño tiene un efecto persistente en el crecimiento de las raíces después de que el estrés ha desaparecido; e incluso las plantas sujetas a períodos cortos de anegamiento, seguidos de condiciones de buen drenaje, pueden mostrar una depresión en el crecimiento de brotes y raíces, absorción de nutrientes y fotosíntesis mucho después de la liberación de los tratamientos. A pesar de que el encharcamiento en prácticamente todos los períodos del ciclo del cultivo puede imponer penalizaciones en el rendimiento, algunos estudios sugirieron que el rendimiento se penaliza más severamente

cuando ocurre un anegamiento durante el período de elongación del tallo (SE) en el trigo (Marti *et al.*, 2015).

El exceso hídrico en el cultivo de trigo afectó principalmente el rendimiento al reducir el crecimiento de las espigas antes de la antesis y al mismo tiempo reducir el número de floretes y granos fértiles por espiga. El efecto del exceso hídrico sobre el número de granos por planta estuvo mediado por sus dos componentes, aunque el componente principal que determinó la pérdida de rendimiento en respuesta a la duración del encharcamiento durante SE fue el número de granos (Marti *et al.*, 2015).

La soja es particularmente sensible al encharcamiento, lo que resulta en una mala calidad de la semilla y una reducción significativa del rendimiento, que oscila entre el 17 % y el 46 % en la etapa de crecimiento vegetativo y entre el 50 % y el 56 % en la etapa de estrés reproductivo (Ye *et al.*, 2018).

➤ **Etapas susceptibles al exceso hídrico en diferentes cultivos**

La etapa de macollamiento se identificó como la más susceptible al encharcamiento en trigo, seguida de las etapas de arranque y llenado de grano. El exceso hídrico en la etapa más afectada redujo el rendimiento debido a la reducción en el número de espigas por m² y número de granos por m², mientras que el encharcamiento en la etapa de empalme también disminuyó el rendimiento del grano, principalmente a través de la reducción del peso del grano (X Wu *et al.*, 2015).

Un exceso hídrico de 15 días durante el macollamiento tuvo efectos irreversibles sobre el desarrollo de las raíces secundarias, su longitud y materia seca, debido a que, provocó una reducción en el peso de la raíz y el peso de la parte aérea de alrededor de 40 y 28 % respectivamente (Ghobadi *et al.*, 2017).

4.8. Movimiento del agua en el suelo

El término se refiere al movimiento pasivo del agua a través de las raíces de las plantas desde las capas de suelo húmedas a las secas, un fenómeno que mejora la transpiración de las plantas y otros procesos mediante el suministro de agua a las raíces superiores y su redistribución dentro del sistema radicular; el tipo y la condición del suelo también pueden afectar la magnitud y los patrones de la redistribución hidráulica (HR). La textura del suelo determina la cantidad de agua que un suelo puede retener, así como la

cantidad de agua que pueden extraer las raíces de las plantas a diferentes potenciales hídricos del suelo (Prieto *et al.*, 2012).

La disponibilidad hídrica en el suelo se puede determinar a partir de la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (Macana & Melo, 2010). Uno de los principales factores limitantes para la producción agropecuaria lo constituye la disponibilidad de agua, para conocer de manera satisfactoria la disponibilidad de agua es necesario conocer los valores de CC y el PMP; la relación entre la planta, el suelo y el agua, indica que la estimación del PMP debe vincularse estrechamente con la textura de los suelos, poniendo énfasis en el contenido de arcilla (Hernández *et al.*, 2018).

El PMP se define como el contenido de agua del suelo en el que las plantas están sujetas a una marchitez irrecuperable incluso cuando se colocan en una atmósfera saturada con vapor de agua, se ha utilizado en varios estudios para establecer el límite inferior de agua disponible para las plantas en el suelo (Chagas *et al.*, 2021).

➤ **Movimiento agua, suelo, planta y atmósfera**

La cantidad de agua que fluye a través de la planta o circula por unidad de superficie de cultivo depende de la oferta de agua del suelo, de las características estructurales y funcionales de la planta o el cultivo, y de las condiciones atmosféricas, en cada momento de su vida. El estado hídrico de la planta depende del balance entre el agua que la planta absorbe del suelo y la que pierde por transpiración. Los controles más importantes en este sentido residen en el grado de apertura del poro estomático, la modulación de la expansión foliar, variaciones en el ángulo de inserción foliar en la senescencia y abscisión de una parte de las hojas y cambios en la relación área foliar/extensión de raíces (Martínez-Vilalta *et al.*, 2014).

4.9. Antecedentes

En un estudio realizado en el laboratorio de fisiología de cultivos del Campus de Agricultura y Recursos Naturales de la Universidad Razi, Kermanshah, Irán sobre el cultivo de trigo mencionan que el anegamiento o inundación reduce el crecimiento de brotes, raíces y rendimiento final evaluaron el efecto de los períodos de anegamiento (1 a 4, 4 a 8, 8 a 12 y 12 a 16 días desde el inicio de la germinación de la semilla), también evaluaron tratamientos de encharcamiento con una duración de 15 días en las etapas de crecimiento y testigo sobre diez variedades de trigo. Obtuvieron que, la mayoría de los daños por encharcamiento se observaron entre 1 y 4 y entre 4 y 8 DDG esto mostró claramente que en la etapa de imbibición, la actividad embrionaria y la germinación eran más sensibles a la

anoxia que en otras etapas, la etapa de macollamiento fue más sensible que la etapa de elongación del tallo, el encharcamiento en la etapa de macollamiento provocó una reducción en el peso de la raíz y el peso de la parte aérea alrededor de 40 y 28 % respectivamente, el rendimiento de grano (41,3 %), el número de espigas por planta (32,8 %) y el número de granos por espiga (44,6) (Ghobadi *et al.*, 2017).

En un estudio realizado en el condado de Guanghan, provincia de Sichuan, China, examinaron los efectos del encharcamiento aplicado en diferentes etapas de crecimiento del trigo de invierno sobre las características agronómicas del trigo para identificar el período más sensible al encharcamiento, aplicando todos los tratamientos encharcados durante 35 días una capa de 1 a 2 cm. Obtuvieron como resultado que el encharcamiento en la etapa de macollamiento mostró el mayor efecto sobre el rendimiento de grano, con una reducción de 10 a 15 % en comparación con el control, seguido de las etapas de empalme, arranque y llenado de grano, mientras que el encharcamiento en la etapa de arranque redujo el índice de área foliar y en la etapa de llenado de grano lo aumentó (X Wu *et al.*, 2015).

En un estudio realizado en la India sobre el frijol mungo *Vigna radiata* L. evaluaron el crecimiento y las respuestas del rendimiento con tolerancia al encharcamientos, los tratamientos tuvieron una duración de 3, 6 y 9 días de encharcamiento y el control en el cual obtuvieron como resultado que el encharcamiento de 9 días provocó el amarillamiento de las hojas y redujo el crecimiento de las plantas de todos los genotipos, el crecimiento de las raíces también se vio afectado, exhibieron una acumulación de materia seca relativamente mayor en la raíz y una ligera reducción en el tallo y la hoja en comparación con su control. Concluyendo que las pérdidas de rendimiento aumentaron con el aumento de la duración del encharcamiento en la etapa vegetativa (Kumar *et al.*, 2013).

5. Metodología

5.1. Ubicación del área de estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en el invernadero perteneciente a La Quinta Experimental Docente la Argelia (QEDA) de la Universidad Nacional de Loja UNL (Figura 2), la cual se encuentra ubicada en el sur del cantón Loja, parroquia San Sebastián, sector La Argelia misma que presenta las siguientes coordenadas geográficas y condiciones climáticas:

- **Latitud:** 4° 2' 17,25" S
- **Longitud:** 79° 12' 0,05" O
- **Altitud media:** 2135 m.s.n.m.
- **Temperatura promedio:** 18°C
- **Precipitación media anual:** 1058 mm (Villavicencio, 2021).

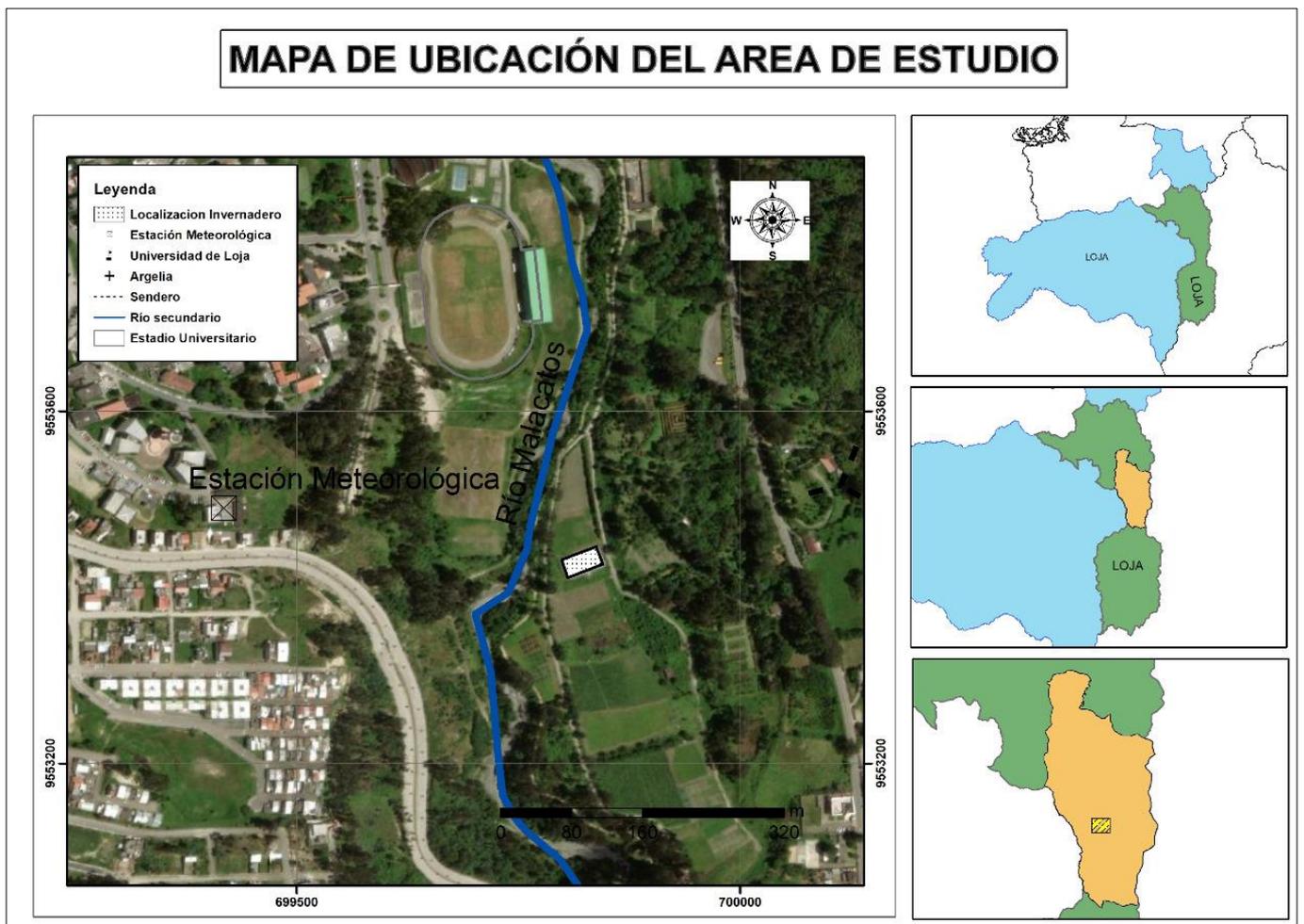


Figura 2. Ubicación del área de estudio donde se desarrolló el proyecto de investigación.

Fuente: Autor.

5.2. Metodología general

Se utilizaron fundas plásticas de polietileno de 30 x 30 cm (12x18”) en las cuales se colocó un sustrato que estuvo compuesto por tierra, arena de río para facilitar el drenaje y biocompost, con una proporción de 3:1:1 respectivamente (Anexo 7), se procedió a regar todas las fundas para proceder a la siembra colocando tres semillas de quinua variedad Tunkahuan por funda a 2 cm de profundidad (Anexo 8), la semilla de quinua se adquirió en el INIAP Estación Experimental Santa Catalina ubicado en Quito. Para los tratamientos de exceso hídrico se utilizaron baldes de plástico de 20 litros (26,5 cm y 38,6 cm). Se realizó un plan de fertilización para lo cual, se consideró los análisis químicos realizados por Pineda (2022) en el área de estudio en el cual obtuvieron: pH: 5,96; M.O: 1,77 %; N: 0,09 %; P: 16,3 mg/Kg; K: 0,10 cmol/Kg; Ca: 3,81 cmol/Kg; Mg: 0,28 cmol/Kg; Fe: 205,1 mg/Kg; Mn: 13,17 mg/Kg; Cu: 2,68 mg/Kg y Zn: <1,60 mg/Kg (Anexo 35). Con base en estos análisis se proporcionó fertilización a base de urea, DAP y muriato de potasio con dosis de 65, 70, 136 g/parcela respectivamente realizando dos aplicaciones la primera del 30 % y la segunda del 70 % (Anexo 10).

Así mismo, se monitoreó permanentemente al cultivo encontrando la presencia de insectos masticadores para lo cual se aplicó un insecticida de componentes activos Chlorpyrifos + Cypermethrin con una dosis de 15 ml por bomba de 20 litros cada 15 días.

5.2.1. Medición de la temperatura y humedad ambiental

Se colocó un termohigrómetro modelo 40550 en el invernadero en mitad de las macetas con las plantas para medir diariamente la temperatura y humedad del aire desde la siembra hasta su cosecha para todos los tratamientos con sus repeticiones.

5.2.2. Tipo de investigación

Se realizó una investigación experimental donde se pudo determinar el periodo crítico ante el exceso hídrico que afecta el crecimiento y rendimiento del cultivo de quinua en diferentes etapas vegetativas durante el ciclo del cultivo, identificando así la fase más sensible; la presente investigación tiene un enfoque cuantitativo debido a que se realizaron mediciones numéricas de las diferentes variables del crecimiento del cultivo y así mismo para determinar el rendimiento se tomaron medidas numéricamente de las diferentes variables, también se tomaron datos de la temperatura y humedad bajo invernadero. Finalmente, la investigación tiene un alcance causal – comparativo.

5.2.3. *Diseño experimental*

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar (DCA) donde el factor fue el exceso hídrico aplicado en diferentes fases fenológicas, se utilizaron 7 tratamientos incluido el control con cinco repeticiones, teniendo un total de 35 unidades experimentales (UE) (Figura 3), donde cada UE estuvo constituida por una funda con tres plantas, dando un total de 105 plantas en todo el ensayo. En todos los tratamientos el exceso hídrico tuvo una duración de 12 días, aplicado en distintas fases fisiológicas desde los cinco brotes laterales visibles (25) hasta el llenado de grano (85) según cada tratamiento, como se visualiza en la tabla 2 y anexo 12.

Para aplicar los tratamientos de exceso hídrico, las fundas se colocaron en baldes de plástico con el agua igual a la superficie del sustrato de las fundas durante todo el período de cada tratamiento de exceso hídrico (Figura 4 y Anexo 21). Una vez finalizado cada tratamiento de exceso hídrico se sacaron las fundas de los baldes y estuvieron sin riego durante 16 días en los primeros tratamientos (Anexo 22) en las etapas de crecimiento cinco brotes laterales visibles (25) - Inicio del botón floral (50) (Anexo 16) y 7 días en los últimos tratamientos (Anexo 23) en las etapas reproductivas inicio de antesis (60) - llenado de granos (85), permitiendo el drenaje y después se volvió a regar normalmente. Las fundas que estuvieron fuera del tratamiento de exceso hídrico incluido el control se mantuvieron siempre en capacidad de campo, desde la siembra hasta la madurez, como en estudios previos realizados por Wollmer *et al.* (2018) y de San Celedonio *et al.* (2018).

Tabla 2. Tratamientos utilizados en el ensayo de exceso hídrico en quinua dependiendo de la etapa fenológica con sus respectivos códigos de la escala BBCH descrita por Sosa-Zuniga et al. (2017). Cada tratamiento implica el período en el que se aplicó el periodo de exceso hídrico de 12 días.

Tratamientos	Código BBCH
Control, sin exceso hídrico	(C1)
Cinco brotes laterales visibles	(25)
Inicio del botón floral	(50)
Inicio de antesis	(60)
Mitad de antesis	(67)
Antesis completa	(70)
Llenado de granos	(85)

Fuente: Autor

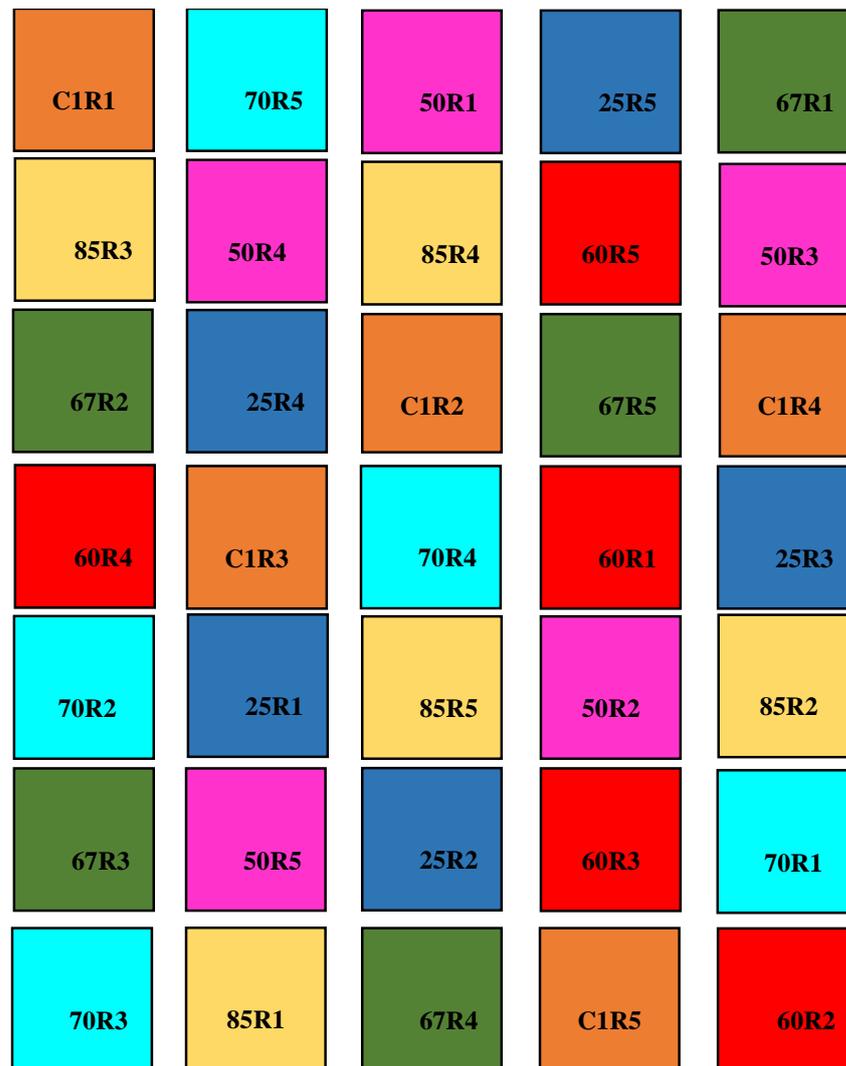


Figura 3. Esquema de la implementación del experimento, donde los códigos de 2 dígitos indican los estados fenológicos según la escala BBCH y R nos indica el número de repetición.

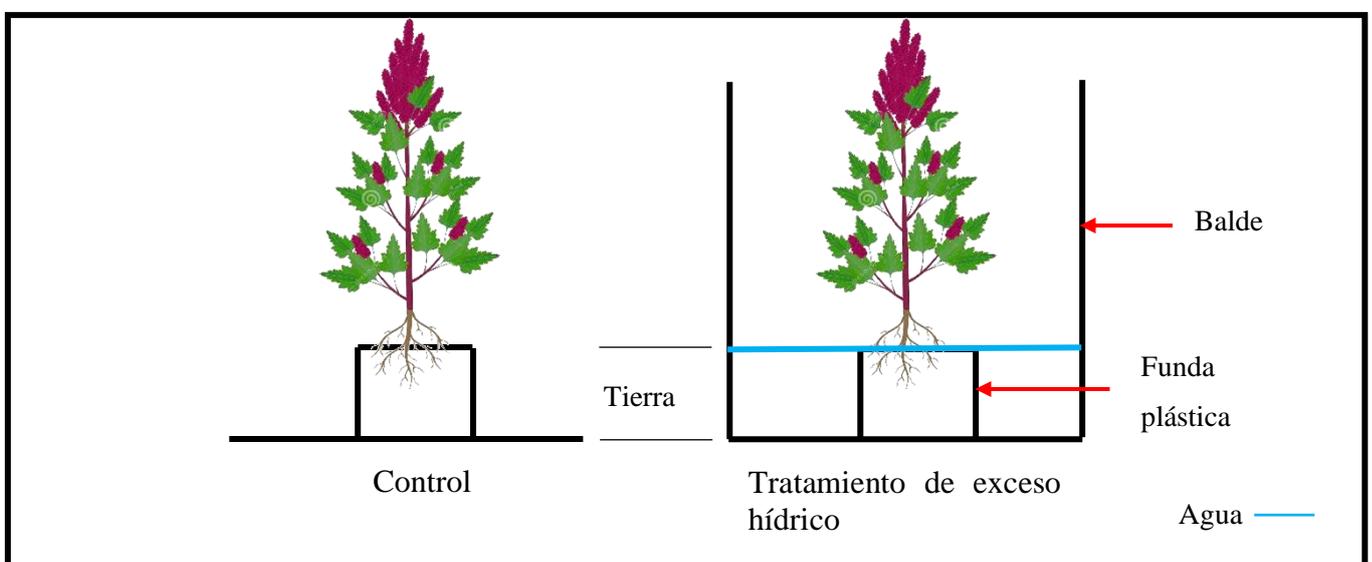


Figura 4. Representación del esquema del experimento. Se utilizó un balde para los tratamientos de exceso hídrico y un control que se encuentra en condiciones normales durante la aplicación de los tratamientos.

3.2.4. Modelo estadístico

Considerando que se utilizó un DCA, se empleó el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} es la j-ésima observación del i-ésimo tratamiento (variable de respuesta)

μ es la media general común a todos los tratamientos (promedio)

τ_i es el efecto fijo del tratamiento i (exceso hídrico)

ε_{ij} es una variable aleatoria normal (error)

τ = exceso hídrico

i = son los niveles en nuestro ensayo son 9 (tratamientos).

5.3. Metodología para cada objetivo

5.3.1. Metodología para el primer objetivo “Describir el crecimiento vegetativo del cultivo de quinua expuestas al exceso hídrico bajo condiciones controladas”

➤ Fenología

Una vez que se realizó la siembra del cultivo se dio seguimiento a la fenología y el crecimiento del cultivo de quinua, para lo cual se utilizó como referencia la escala BBCH misma que fue elaborada por Sosa-Zuniga *et al.* (2017). Esta ayudó a determinar el estado fenológico de las etapas principales que fueron sometidas a exceso hídrico y así mismo a evidenciar cuándo se da un cambio en la fenología del cultivo desde que inició la germinación (Anexo 9) hasta la cosecha, para esto se hizo un registro semanal de la misma (Tabla 3).

Tabla 3. Etapas de crecimiento fenológico de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) basadas en la escala BBCH.

Código	Descripción
0	Germinación
1	Desarrollo de las hojas
2	Formación de brotes laterales
3	Elongación del tallo
4	Desarrollo de partes vegetativas cosechables
5	Emergencia de florescencia
6	Floración
7	Desarrollo del fruto
8	Fruto maduro
9	Senescencia

Fuente: (Sosa-Zuniga *et al.*, 2017).

Se llevó a cabo la medición de las variables de crecimiento y rendimiento observadas en la metodología de Villavicencio (2021). Para el primer objetivo se utilizó la planta del centro de cada unidad experimental; se registraron los datos al final de cada periodo de exceso hídrico a los 42, 53, 64, 91, 108, 117, 132 y 146 DDS de todas las UE de las variables de altura, diámetro, cobertura vegetal y contenido de clorofila.

➤ **Altura de la planta**

Se tomaron las medidas en centímetros del tallo principal desde la base hasta el ápice de la panoja, con la ayuda de un flexómetro (Anexo 13 y 18).

➤ **Diámetro del tallo**

Se tomaron las medidas en centímetros de la parte inferior del tallo con la ayuda de un calibrador (Anexo 14).

➤ **Cobertura vegetal**

Se estimó el porcentaje (%) de cobertura vegetal mediante fotografías con ayuda de la aplicación Canopeo, para lo cual se colocó el celular sobre la maceta con las plantas a la misma distancia y con el mismo horizonte para todos los tratamientos.

➤ **Índice de área foliar**

Se determinó mediante imágenes hemisféricas, cada 15 días se tomaron fotos desde abajo hacia arriba utilizando la cámara Go pro⁹ acoplada con un lente de ojo de pez que nos permite un campo de visión de 180 grados, esto consiste que la cámara se colocó en el suelo ubicada en el centro de las fundas como se observa en el anexo 19 y finalmente se las analizó mediante el software Can-Eye (INRA), como sugieren Apolo *et al.* (2020).

➤ **Contenido de clorofila (Valor SPAD)**

Se determinó las lecturas de clorofila mediante el equipo Minolta SPAD 502, que evalúa cuantitativamente la cantidad de clorofila en la hoja. Se tomaron medidas colocando el SPAD en dos hojas de cada planta y se obtuvo el valor promedio de clorofila de cada unidad experimental (Anexo 11 y 17).

5.3.2. Metodología para el segundo objetivo “Identificar la etapa fenológica más susceptible al exceso hídrico que afecta el rendimiento del cultivo de quinua”

Para dar cumplimiento con las variables de rendimiento estas se evaluaron al final del experimento. Se utilizaron dos plantas de cada UE para cada tratamiento.

➤ **Biomasa aérea**

La biomasa aérea se determinó en madurez de cosecha, por lo cual se cosecharon (Anexo 24). Se eligieron 2 plantas de la cual se separaron los granos, y el resto de la biomasa (tallos, ramas y hojas) con una tijera de podar como se observa en el anexo 25, el material vegetal fue colocado en fundas de papel (Anexo 26). Posteriormente fue secado en una estufa a 70 ° (Anexo 28). Y se pesó en una balanza gramera hasta llegar a peso constante (Anexo 27).

➤ **Peso de 1000 granos**

Para determinar esta variable se cosecharon y trillaron las plantas y los granos que se obtuvieron fueron limpiados mediante tamizadores, seguidamente fueron pasados por la máquina de limpiar quinua (Anexo 32,33). Posteriormente fueron pesados así se estableció el peso de una muestra representativa de 100 granos como se observa en el anexo 29 y 30, finalmente mediante una regla de tres se expresó el peso de 1000 granos en gramos (Anexo 31).

➤ **Número de granos**

Para determinar el número de granos se pesó la totalidad de granos por planta, y usando la información del peso de 100 granos se estimó el número total de granos por planta mediante regla de tres.

➤ **Rendimiento**

Se obtuvo después de la cosecha una vez obtenidos los componentes del rendimiento de la quinua, se determinó aplicando la siguiente fórmula:

$$R = NG \text{ planta}^{-1} * PG$$

Donde:

R= Rendimiento

NG planta⁻¹ = número de granos por planta

PG= Peso promedio de granos

➤ **Índice de cosecha (IC)**

Se evaluó después de la cosecha, una vez determinada la biomasa y rendimiento, para lo cual se aplicó la siguiente fórmula:

$$IC = \frac{\text{rendimiento de planta}^{-1}}{\text{Biomasa aérea total planta}^{-1}}$$

El periodo crítico del rendimiento por exceso hídrico se identificó, utilizando los valores de rendimiento que difirieron estadísticamente del control y que se agruparon en la categoría más baja según el test de Tukey al 95 %.

5.4. Análisis estadístico

Los datos fueron registrados y tabulados en la base de datos de Microsoft Excel para su análisis estadístico en Infostat versión libre. Los datos registrados fueron ingresados en el programa estadístico, luego sometidos al análisis de varianza ANAVA ($p < 0,05$). Para la comparación de medias en los tratamientos se empleó la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 95 %. Previo al ANAVA se evaluaron los supuestos estadísticos de independencia, normalidad mediante el análisis estadístico de la prueba de normalidad (Shapiro-Wilks modificado) y homogeneidad mediante el análisis estadístico del test de Levene.

6. Resultados

6.1. Resultados para el primero objetivo

6.1.1. Fenología del cultivo y condiciones climáticas

➤ Fenología del cultivo

La duración del ciclo del cultivo fue de 180 días desde la siembra hasta la cosecha para las plantas que estuvieron sin exceso hídrico (control) como se observa en la figura 5, sin embargo, los tratamientos correspondientes a las etapas vegetativas T1 (cinco brotes laterales) alargaron su ciclo con 203 días y el T2 (inicio del botón floral) demoró 196 días, aumentando su duración con 23 y 16 días respectivamente con respecto al control, así mismo se observó que el inicio de antesis para los dos primeros tratamientos fueron a los 96 y 90 días respectivamente y la del control fue a los 79 días. En cuanto a las etapas reproductivas el T3 (inicio de antesis) disminuyó su ciclo con 164 días obteniendo una diferencia de 16 días con respecto al control, en cuanto a T4 (mitad antesis), T5 (inicio llenado de grano) y T6 (fin de llenado de grano) existió una similitud entre tratamientos los mismos que obtuvieron 159 días, por lo tanto, estos disminuyeron 21 días en su periodo en comparación con el control, evidenciando que la etapa de senescencia en los últimos tratamientos duró 22 días y en el control 43 días.

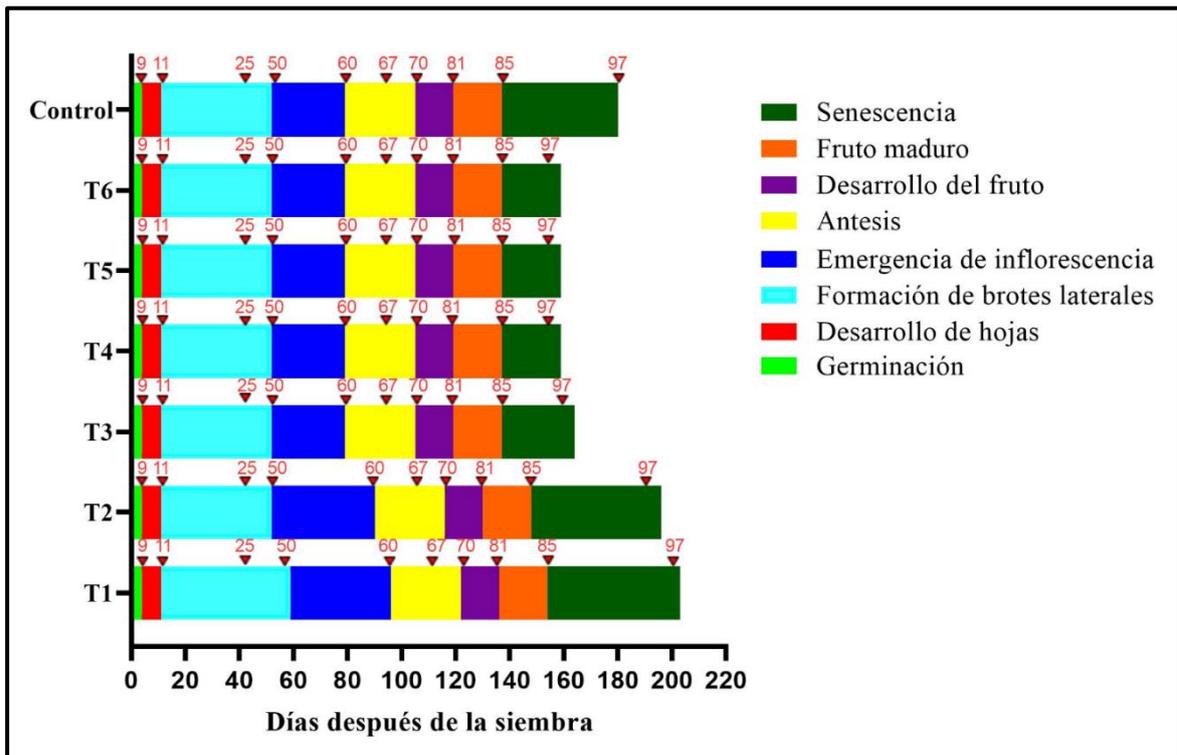


Figura 5. Fenología del cultivo de quinua para los diferentes tratamientos expuestos a exceso hídrico incluido el control, medidas según la escala BBCH en función de los DDS desde la emergencia hasta la senescencia de las plantas. Donde cada número sobre las barras significa el cogido de las etapas principales del cultivo.

➤ Condiciones climáticas

En las condiciones climáticas durante el desarrollo del cultivo se observó que en cuanto a la temperatura máxima esta se dio a los 40 DDS llegando a presentar 39,1 °C (Figura 6), cuando las plantas se encontraban en los cinco brotes laterales, seguido de una temperatura de 34,9 °C a los 100 DDS correspondiente a las etapas de mitad de antesis e inicio de llenado de grano; así mismo en cuanto a la temperatura mínima se observó que se obtuvo 9 °C a los 144 DDS cuando las plantas estaban en la etapa de fruto maduro. En cuanto a la menor cantidad de humedad relativa (HR) se observó que a los 38 DDS presento el 57% cuando las plantas se encontraban en el desarrollo vegetativo, en el crecimiento de los brotes laterales, así mismo se encontró que la mayor cantidad de HR se encontró en el segundo DDS con 80 % evidenciando que ocurrió lo mismo a los 126 DDS cuando las plantas se encontraban en grano lechoso.

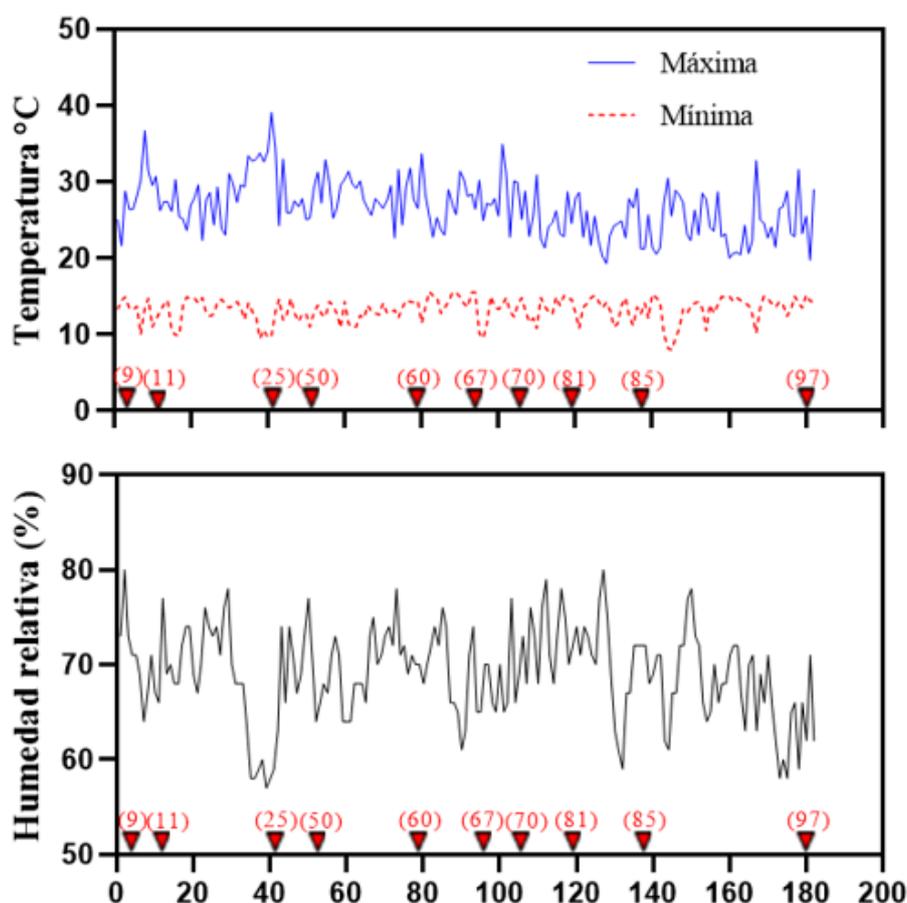


Figura 6. Variables climáticas de temperatura máxima (azul), mínima (roja) y humedad relativa (HR) acumulada durante el ciclo del cultivo de quinua, triángulos rojos hacia abajo con los números indican los códigos de la escala fenológica BBCH representando las etapas principales en función de los DDS.

6.1.2. Altura de planta

El efecto del exceso hídrico se empezó a notar a los 12 días después de aplicar el primer tratamiento (i.e. 53 DDS), evidenciando que el menor valor de altura de planta se presentó en el tratamiento con anegamiento en la etapa BBCH 25 la cual obtuvo 37 cm, diferenciándose del resto de tratamientos que no fueron estresados. En las siguientes evaluaciones, se encontró que se mantuvo una tendencia de menor crecimiento de las plantas estresadas (Anexo 15) en las etapas BBCH 25 y BBCH 50 hasta los 117 DDS. Conforme las plantas avanzaron en su crecimiento, se observó un incremento en la altura, sin embargo, las plantas estresadas en BBCH 25, 50 y 60 no lograron compensar las pérdidas en su altura, obteniendo menor crecimiento en comparación con los demás tratamientos incluido el control (Figura 7).

Así mismo, a los 146 DDS donde la altura cesó su crecimiento en todos los tratamientos estresados por el exceso hídrico incluido el control, se observó que los tratamientos anegados en las etapas fenológicas BBCH 50 y BBCH 60 disminuyeron su crecimiento en un - 24,40 % - 16,19 % respectivamente en relación al control y a la etapa BBCH 85, los cuales obtuvieron el mayor crecimiento durante todo el ciclo del cultivo. En la última evaluación, se observó que el segundo tratamiento fue el que obtuvo el menor valor, siendo significativamente diferente (p -valor < 0,05) de todos los demás (Anexo 2).

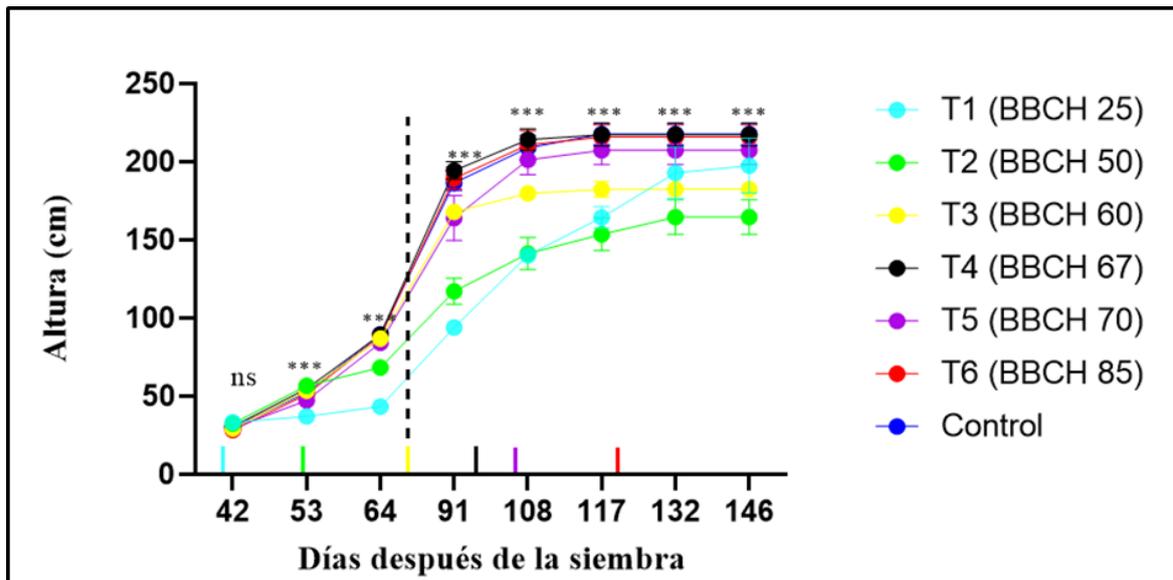


Figura 7. Altura de las plantas en diferentes días después de la siembra en función del periodo sometido a exceso hídrico, según la escala fenológica BBCH de la quinua. Las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje “x” hacen referencia al inicio del periodo de exceso hídrico en cada etapa fenológica. La línea entrecortada vertical indica el inicio del inicio de antesis; (ns) efecto no significativo; (***) efecto significativo.

6.1.3. Diámetro del tallo

No se observó efecto del exceso hídrico hasta los 117 DDS, no obstante, se encontró un efecto a los 78 días después del inicio del T1 (i.e. 132 DDS), donde las plantas que fueron estresadas en la etapa BBCH 25 presentaron el mayor valor con 1,55 cm y 1,6 cm a los 132 y 146 DDS respectivamente, por lo cual el control con 1,2 cm no superó el diámetro de la etapa BBCH 25, siendo así que el primer tratamiento superó al control en al menos un 25 % de crecimiento (Figura 8), observándose que este fue significativamente diferente de todos los demás tratamientos (Anexo 3).

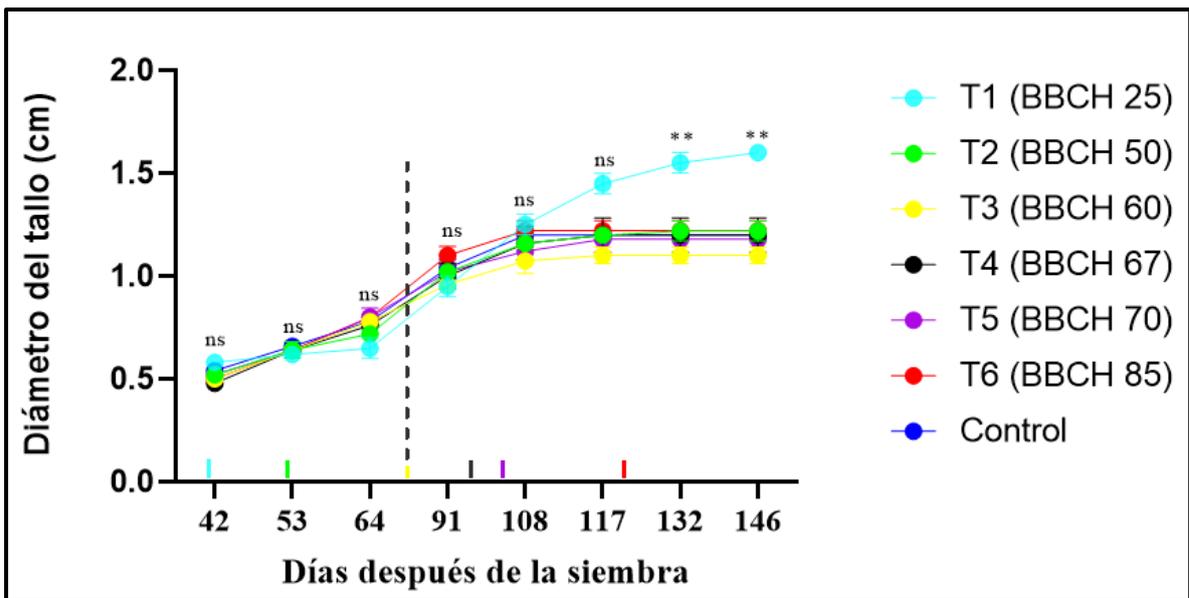


Figura 8. Diámetro del tallo de las plantas evaluadas a los 42 DDS hasta los 146 DDS en función del periodo sometido a exceso hídrico, según la escala BBCH del cultivo de quinua. Las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje "X" hacen referencia al inicio del periodo de exceso hídrico en cada etapa fenológica. La línea entrecortada vertical indica el inicio de antesis; (ns) efecto no significativo; (**) efecto significativo $p < 0,01$.

6.1.4. Cobertura vegetal y contenido de clorofila

Se observó que luego de aplicar cada uno de los tratamientos, las plantas presentaron una disminución en la cobertura vegetal en todas las etapas estresadas, las mismas que no pudieron recuperarse, no obstante, conforme avanzaba el crecimiento de las plantas, solo los dos primeros tratamientos de las etapas BBCH 25 y BBCH 50 lograron desarrollarse llegando a obtener valores similares a los del control (Figura 7a), ocurriendo lo mismo con la variable del contenido de clorofila (Figura 7b). Todas las plantas que fueron estresadas después de antesis disminuyeron significativamente los valores de cobertura y clorofila, comparados con los tratamientos estresados en pre-antesis (Figura 9a y b, anexos 4 y 5), siendo así que a los 146 DDS, las etapas BBCH 60 y BBCH 67 fueron las más afectadas disminuyendo en un 82,03 % y 74,42 % respectivamente en comparación con el control

(Anexo 20). Sin embargo, en el contenido de clorofila se logró observar que el mayor efecto del exceso hídrico se dio los 23 días después de aplicar el T1 (i.e. 64 DDS) en la segunda etapa fenológica BBCH 50 con 30,80 a diferencia del control que obtuvo 40,73. A los 146 DDS las etapas BBCH 67 y BBCH 70 presentaron una disminución de 75,80 % y 70 % respectivamente en comparación con el control, por lo cual los dos primeros tratamientos con menor crecimiento son diferentes de todos los demás (Figura 9b, anexo 5).

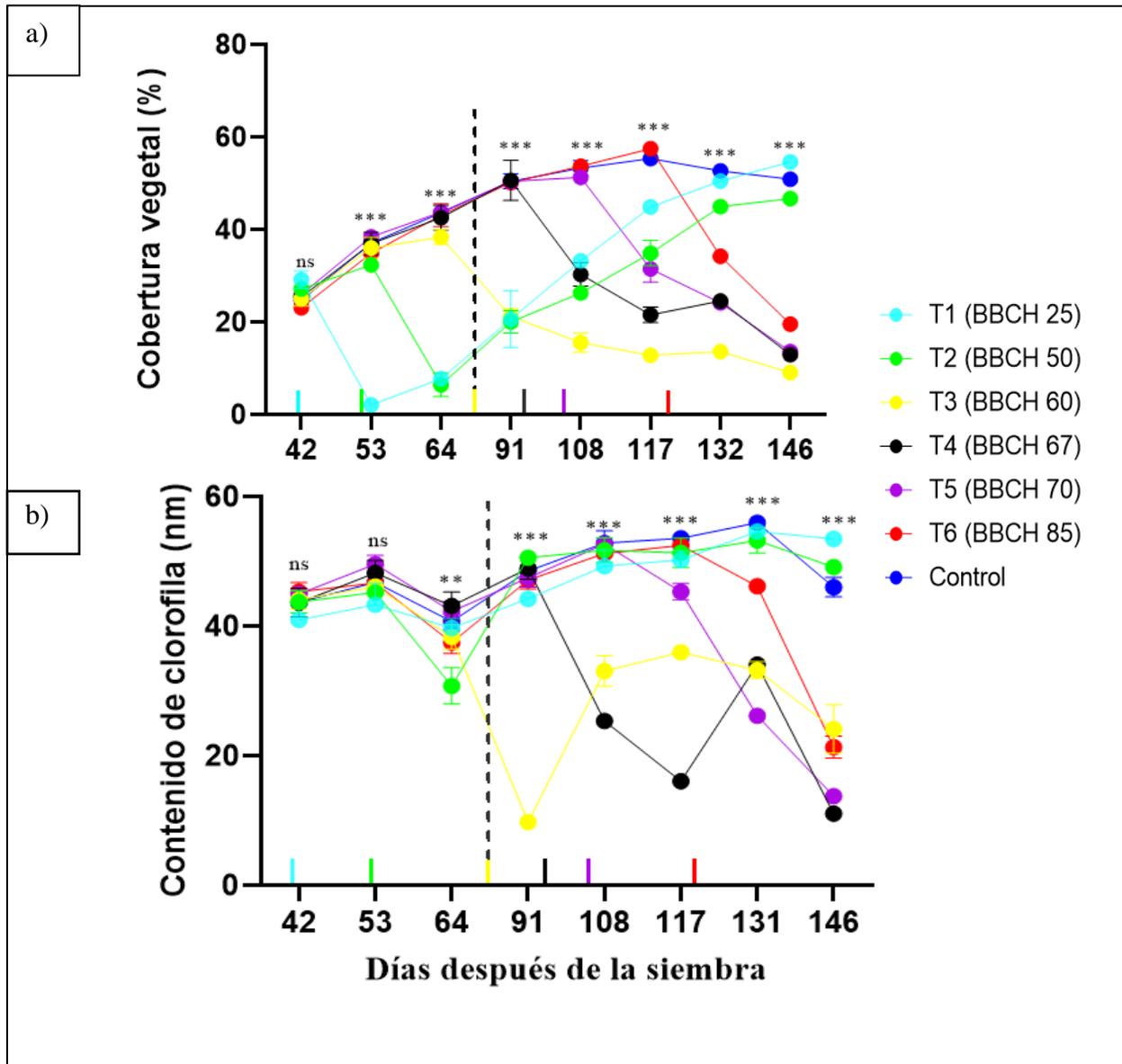


Figura 9. Cobertura vegetal (a) y contenido de clorofila (b) de las plantas evaluadas desde los 42 DDS hasta los 146 DDS en función del periodo sometido a exceso hídrico, según la escala BBCH del cultivo de quinua. Las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje “X” hacen referencia al inicio del periodo de exceso hídrico en cada etapa fenológica. La línea vertical entrecortada indica el inicio de antesis; (ns) efecto no significativo; (**) efecto significativo $p < 0,01$; (***) efecto significativo $p < 0,001$.

6.1.5. Índice de área foliar (IAF)

El mayor efecto del exceso hídrico se dio a los 19 días después de aplicar el tratamiento T1 y 8 días de después de aplicar el T2 (i.e. 60 DDS), obteniendo que la etapa BBCH 25 obtuvo el menor valor con 0,93 diferenciándose de todos los demás tratamientos (Anexo 6), observando que ocurrió el mismo efecto con los demás tratamientos en los cuales luego de estresar las plantas en las diferentes etapas después del inicio de antesis no lograron recuperarse (Figura 10). Sin embargo, a medida que el cultivo fue desarrollándose, las etapas BBCH 25 y BBCH 50 lograron obtener valores similares al control. Así mismo, a los 144 DDS las etapas fenológicas BBCH 60 y BBCH 67 disminuyeron un 82,70 % y 78,8 % respectivamente en comparación con el control obteniendo menor desarrollo de IAF.

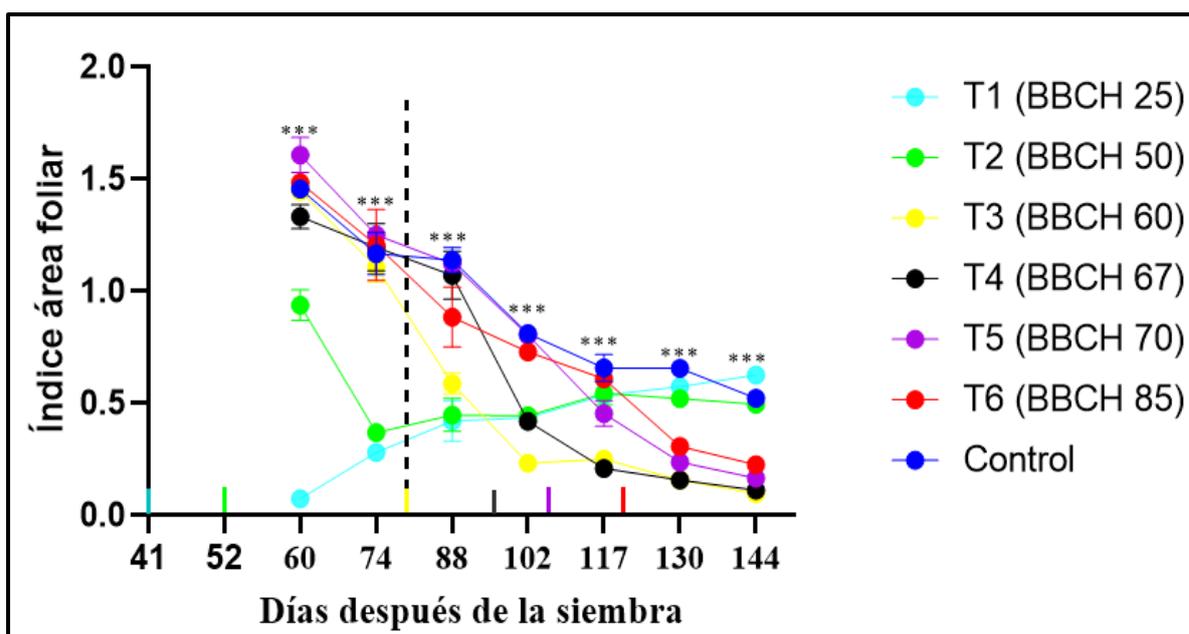


Figura 10. Índice de área foliar de las plantas evaluadas desde los 41 hasta los 144 DDS en función del periodo sometido a exceso hídrico, según la escala BBCH del cultivo de quinua. Las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje “X” hacen referencia al inicio del periodo de exceso hídrico en cada etapa fenológica. La línea entrecortada vertical indica el inicio de antesis; (***) efecto significativo $p < 0,001$.

6.2. Resultados para el segundo objetivo

6.2.3. Rendimiento, componentes del rendimiento e índice de cosecha

Existió un efecto del exceso hídrico en los diferentes tratamientos en comparación del control el mismo que fue diferente de todos los demás para todas las variables, sin embargo, para la variable de biomasa y el peso de 1000 granos el T3 (inicio de antesis) fue más afectado con $38,79 \text{ g planta}^{-1}$ y $2,43 \text{ g}$ respectivamente, siendo diferente de todos los demás tratamientos (Tabla 4) incluido el control el mismo que obtuvo $94,03 \text{ g}$ y $3,13 \text{ g}$; así mismo en cuanto al N° granos planta^{-1} y maceta^{-1} el T4 (mitad de antesis) obtuvo menor

número con 2894 y 8683 respectivamente y el control presentó 13144 granos planta⁻¹ y 39431 granos maceta⁻¹; para el rendimiento el T4 (mitad de antesis) fue más afectado presentando 7,48 g planta⁻¹ y 22,44 g maceta⁻¹ siendo diferente de todos los demás tratamientos obteniendo en el control 41,09 g planta⁻¹ y 123,23 g maceta⁻¹ finalmente, en cuanto al índice de cosecha (IC) el T4 se evidencio que obtuvo los menores valores con 0,14 seguido del T2 (5 brotes laterales) con 0,21 y en el control se obtuvo 0,4.

Tabla 4. Medias de rendimiento de grano y sus componentes e índice de cosecha en plantas de quinua bajo exceso hídrico en diferentes etapas fenológicas y el control.

Tratamientos	Biomasa g planta⁻¹	Biomasa g maceta⁻¹	Peso de 1000 granos (g)	N° granos planta⁻¹	N° granos maceta⁻¹	Rendimiento g planta⁻¹	Rendimiento g maceta⁻¹	Índice de cosecha (IC)
T1 (cinco brotes laterales)	70,90 c	141,80 c	3,08 ab	4940 cd	9881 c	15,24 cde	30,48 c	0,21 cd
T2 (Inicio del botón floral)	79,78 b	159,55 c	3,06 ab	6309 bd	12618 c	18,71 bcd	37,41 c	0,23 cd
T3 (Inicio de antesis)	38,79 e	116,37 d	2,43 c	4417 d	13251 c	10,50 de	31,50 c	0,27 bcd
T4 (Mitad de antesis)	51,90 d	155,70 c	2,64 bc	2894 d	8683 c	7,48 e	22,44 c	0,14 d
T5 (Inicio llenado de grano)	63,62 c	190,86 b	2,78 abc	8216 bc	24648 b	22,91 bc	68,74 b	0,36 abc
T6 (Final de llenado de Grano)	70,50 c	211,50 b	2,95 ab	9433 ab	28299 b	27,87 b	83,61 b	0,40 ab
Control	94,03 a	282,09 a	3,13 a	13144 a	39431 a	41,09 a	123,28 a	0,44 a
CV	5,29	5,75	7,19	22,99	21	20,09	18,96	24,32
Exceso hídrico	***	***	***	***	***	***	***	***

Letras iguales en sentido vertical no expresan diferencia estadística significativa mediante prueba de Tukey ($P < 0,05$). Los valores son medias de 5 repeticiones; (ns) efecto no significativo; (***) efecto significativo $p < 0,001$; CV coeficiente de variación.

➤ Periodo crítico para la determinación del rendimiento

En el rendimiento se observó que, si hubo efecto del exceso hídrico en todos los tratamientos los mismo que se encuentran por debajo del control, sin embargo, se identificó que el periodo crítico por el estrés está comprendido desde los 41 hasta los 96 DDS correspondientes a las etapas vegetativas hasta mitad de antesis los mismo que estuvieron en la categorías más baja en el análisis de Tukey, por lo cual la mayor pérdida fue de 81% en mitad de antesis, así mismo, a los 79 DDS (inicio de antesis) presentó una disminución del 74 % y a los 41 DDS (5 brotes laterales) se obtuvo una pérdida de 62% (Figura 11). Finalmente, a los 119 DDS (final de llenado de grano) fue el tratamiento menos afectado el cual obtuvo una disminución del 32 % relativo al control.

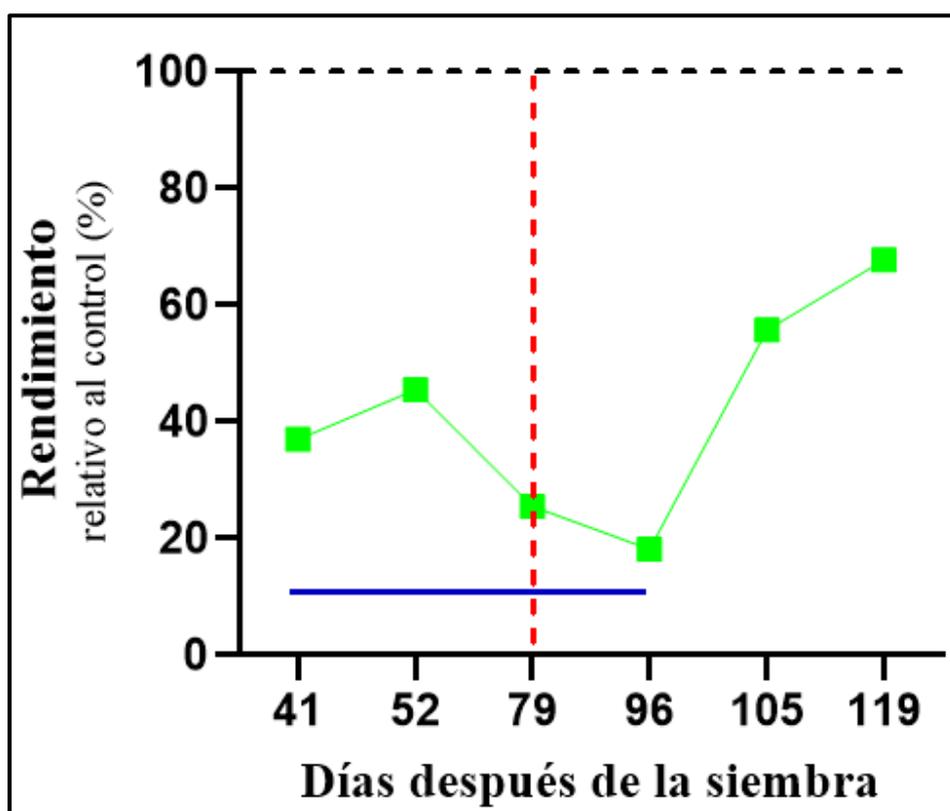


Figura 11. Efecto del exceso hídrico sobre el rendimiento aplicados en diferentes etapas fenológicas, donde cada DDS representa un tratamiento; la línea horizontal entrecortada hace referencia al control y la línea roja vertical indica el inicio de antesis. La línea azul horizontal representa el periodo crítico del rendimiento por exceso hídrico.

6.2.4. Análisis de correlación de las variables de estudio

En la tabla 5 se observa las correlaciones de las diferentes variables estudiadas utilizando el coeficiente de correlación de Pearson. Por lo cual se obtuvo que existe una correlación positiva muy fuerte entre IAF con la cobertura vegetal ($r=0,99$) y SPAD ($r=0,93$); así mismo entre biomasa $g/maceta^{-1}$ con N° granos $planta^{-1}$ en $maceta^{-1}$ ($r=0,93$) y

con rendimiento g/maceta⁻¹ (r=0,96); también existe entre N° granos planta⁻¹ con N° granos maceta⁻¹ (r=0,97) y rendimiento g maceta⁻¹ (r=0,98); el N° granos maceta⁻¹ con rendimiento granos maceta⁻¹ (r=0,99) finalmente entre rendimiento granos maceta⁻¹ con IC (r=0,93); se identificó una correlación positiva media entre peso de 1000 granos y N° granos planta⁻¹ (r=0,58). También se observó que no existe correlación entre altura con diámetro (r=0,03) y peso de 1000 granos (r=0,05); en el SPAD con biomasa g maceta⁻¹ (r=0,10), con N° granos maceta⁻¹ (r=0,02), rendimiento granos maceta⁻¹ (r=0,10) y con IC (r=0,01); y por último no existió correlación entre IAF con IC (r=0,07).

Tabla 5. Correlación de las diferentes variables evaluadas en plantas de quinua bajo exceso

	Altura	Diámetro	Cobertura vegetal	SPAD	IAF	Biomasa g/maceta	Peso 1000 granos	N° granos planta ⁻¹	N° granos Maceta ⁻¹	Rendimiento g/maceta ⁻¹
Diámetro	0,03 ns									
Cobertura vegetal	-0,15 ns	0,64 ns								
SPAD	-0,46 ns	0,54 ns	0,92 **							
IAF	-0,21 ns	0,67 ns	0,99 ***	0,93 **						
Biomasa g/maceta	0,58 ns	-0,17 ns	0,34 ns	0,10 ns	0,28 ns					
Peso 1000 granos	0,05 ns	0,51 ns	0,87 **	0,70 ns	0,88 **	0,58 ns				
N° granos planta ⁻¹	0,38 ns	-0,17 ns	0,36 ns	0,22 ns	0,33 ns	0,93 **	0,58 ns			
N° granos Maceta ⁻¹	0,51 ns	-0,29 ns	0,17 ns	0,02 ns	0,13 ns	0,93 **	0,41 ns	0,97 **		
Rendimiento g/maceta ⁻¹	0,51 ns	-0,22 ns	0,26 ns	0,10 ns	0,22 ns	0,96 ***	0,49 ns	0,98 ***	0,99 ***	
IC	0,37 ns	-0,29 ns	0,09 ns	0,01 ns	0,07 ns	0,70 *	0,33 ns	0,93 **	0,95 ***	0,93 **

hídrico.

Los valores son medias de cinco repeticiones, donde el color melón indica una correlación positiva muy fuerte $0,8 < r < 1$, el color verde indica correlación positiva débil $0,30 < r < 0,10$ y el color amarillo indica una correlación nula $< 0,1$; (ns) efecto no significativo $p > 0,05$; (*) efecto significativo $p < 0,05$; (**) efecto significativo $p < 0,01$; (***) efecto significativo $p < 0,001$.

7. Discusión

Las etapas vegetativas alargaron su ciclo de cultivo debido a que la antesis se retrasó apareciendo 17 días después, estos efectos se deben a que al inicio del desarrollo aún no se han diferenciado los órganos reproductivos y se interrumpe el crecimiento por el exceso hídrico, por lo cual, la planta tiene que volver a diferenciar los tejidos, brote de ramas, provocando que el ciclo del cultivo se alargue estos resultados coinciden con los obtenidos por Robertson *et al.* (2009) los mismo encontraron que en el cultivo de trigo, el encharcamiento durante las primeras etapas vegetativas del cultivo retrasó el período el tiempo de antesis, por lo cual las plantas en condiciones de invernadero aumentaron 22 días más en comparación con el control.

En el presente estudio en las etapas de madurez las plantas disminuyeron 21 días acabando su ciclo más temprano que el control esto debido a que, cuando la planta ya ha diferenciado sus órganos reproductivos como flores o granos y al verse afectada por el exceso hídrico sintetiza más el etileno lo que favorece la senescencia provocando que se acorte la fase del crecimiento del grano, asemejándose al estudio realizado por Liu *et al.* (2020) los mismos encontraron que en el cultivo de cebada durante las fechas de madurez se retrasaron entre 8 y 15 días, por lo cual el tratamiento de preantesis resultó prematuro y las fechas de madurez fueron de 5 a 8 días antes, por consiguiente el ciclo de cultivo tuvo una duración menor al control. Así mismo, en el cultivo de trigo observaron que la senescencia provocó una madurez más temprana del grano en trigo en comparación con las plantas control, durante el llenado de grano las hojas de las plantas envejecieron antes y este periodo se hizo más corto obteniendo granos pequeños (Hossain *et al.*, 2011; Shao *et al.*, 2013).

La temperatura máxima fue de 39,1 °C a los 40DDS (etapa llenado de grano) y una mínima de 9 °C a los 144 DDS (fruto maduro), en cuanto a la mayor HR fue de 80 % a los 2 DDS y a los 126 DDS (grano lechoso) y la menor HR fue de 57 % a los 38 DDS (brotes laterales). Estos resultados coinciden con los realizados por Farkas *et al.* (2020) los mismo que mantuvieron una HR del 60 a 80 % en el cultivo de trigo durante todo el periodo de crecimiento, así mismo, de San Celedonio *et al.* (2014) llegaron a una temperatura máxima del 33 % en la etapa de madurez, los mismos asocian a que cuando existe temperaturas altas se da un aumento en la demanda de transpiración atmosférica y presumiblemente aumentó el estrés de las plantas obteniendo como resultado plantas más pequeñas y débiles.

Para la variable altura en el presente estudio se obtuvo que las plantas de las etapas fenológicas vegetativas fueron más afectadas, siendo el primer tratamiento BBCH 25 en el que se obtuvo la mayor cantidad de plantas muertas. Estos resultados coinciden con los realizados por Tian *et al.* (2020) y Kaur *et al.* (2019), los cuales obtuvieron en el cultivo de maíz que el encharcamiento durante 15 días en la etapa V3 (etapa de crecimiento) tuvo los efectos más fuertes sobre la altura de las plantas, así mismo, las alturas fueron significativamente más bajas para todas las plantas cuando se saturaron de agua durante 14 días en comparación con los tratamientos sin saturación de agua, lo que indica un crecimiento más lento de las plantas en condiciones de exceso hídrico. Bradford y Yang (1981) atribuyen esta reducción a un menor suministro de citoquininas y giberelinas, sintetizadas en las raíces estresadas hacia el tallo. Se conoce que las citoquininas promueven la división y diferenciación celular, mientras que las giberelinas promueven el crecimiento y desarrollo floral (Robles-Bermúdez *et al.*, 2012). Además, la drástica reducción del crecimiento longitudinal del tallo por el exceso hídrico puede ser también influenciada por el etileno cuya síntesis es mayor bajo condiciones de anoxia, debido a la mayor producción de la aminociclopropano carboxilasa (ACC) (enzima que promueve la biosíntesis del etileno) en las raíces y su transporte al tallo (Shiu *et al.*, 1998). Se debería realizar un estudio fisiológico a profundidad para entender de mejor manera los cambios que ocurren en el crecimiento de la planta.

En cuanto al diámetro del tallo, en el presente estudio no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la mayoría de fechas, por lo cual el diámetro parece ser una variable resistente al exceso hídrico. Esto tiene relación con los resultados de Garcia *et al.* (2020) los cuales en sus estudios obtuvieron que 7 días de recuperación dieron como resultado un diámetro de tallo similar entre las plantas sometidas a exceso hídrico y el control en el cultivo de soja durante un periodo de 7 días de anegamiento. Así mismo se asemeja con un estudio realizado por Zhang *et al.* (2019) en el que obtuvieron poca diferencia en el diámetro del tallo entre los tratamientos de exceso hídrico y el control en el cultivo de sorgo. Así mismo se identificó que en las primeras fechas la etapa de crecimiento BBCH 25 fue la más afectada debido a que murieron más plantas, lográndose recuperar las restantes, las cuales obtuvieron un crecimiento mayor al control durante las últimas fechas, esto se debe a que tenían menor densidad de plantas, por lo cual no se generó mayor competencia de nutrientes. Esto coincide con Asher *et al.* (2022) quienes obtuvieron que una mayor densidad de plantas de quinua entre hilera puede conducir a una mayor competencia por la luz solar y

los nutrientes, lo que resulta en un menor diámetro del tallo, indicando que la baja densidad de población entre plantas aumenta el diámetro del tallo.

Se observó que el contenido de clorofila (SPAD) variaba significativamente según cada tratamiento, evidenciando que todas las etapas vegetativas y reproductivas fueron afectadas, debido a que después del exceso hídrico las plantas presentaron clorosis, identificando en la etapa vegetativa al tratamiento BBCH 25 como la más afectada, recuperándose durante las últimas fechas. Por lo cual, Niki *et al.* (1978) dicen que las reducciones del contenido de clorofila y la capacidad fotosintética se han correlacionado principalmente con la alteración de la morfología del cloroplasto y la ultraestructura de las hojas funcionales. Los cloroplastos y las mitocondrias son los principales sitios generadores de especies reactivas del oxígeno (ROS) en condiciones de estrés (Xu *et al.*, 2006).

Así mismo, la disminución del SPAD tiene relación con la reducción del IAF (Índice de área foliar) debido a los efectos del exceso hídrico en todos los tratamientos en comparación con el control, ya que las plantas perdieron la capacidad fotosintética y las hojas inferiores iban muriendo. Esto concuerda con los resultados obtenidos por País *et al.* (2021; 2023) en trigo, quienes encontraron cambios en el contenido de clorofila y en su composición, los cuales tuvieron un efecto directo en la eficiencia fotosintética, y, por tanto, en el crecimiento de las plantas. También encontraron que las plantas anegadas tuvieron senescencia prematura de las hojas basales, lo que corresponde a la degradación de la clorofila para la removilización del nitrógeno a las hojas más jóvenes. En estudios realizados por Ren *et al.* (2016; 2014) obtuvieron efectos negativos del exceso hídrico con un periodo de 6 días sobre IAF en el cultivo de maíz después de la aplicación de los tratamientos, por lo cual IAF fueron más bajos que los del control en las etapas de crecimiento. En el estudio de Marashi (2014) obtuvo que en el cultivo de trigo el IAF en condiciones de exceso hídrico mostró una reducción al final de los tratamientos con una duración de 14 días, debido a que las condiciones de anegamiento causa manchas necróticas en la superficie inferior de las hojas llegando a caer posteriormente. Así mismo, estos efectos también se deben a la síntesis del etileno como respuesta a las condiciones de estrés como se indicó anteriormente en el estudio de (Shiu *et al.*, 1998).

En cuanto a la biomasa se obtuvo que todos los tratamientos fueron afectados por el exceso hídrico, sin embargo, el T3 (inicio de anthesis) fue el más afectado, por lo cual de San Celedonio *et al.* (2017; 2014) nos dicen en su estudio, que los tratamientos antes de anthesis

redujeron la acumulación de biomasa aérea, observando en trigo una disminución del 60 % y cebada del 68 % pero, la respuesta varió dependiendo del tratamiento de anegamiento y la etapa en la que se evaluó. Así mismo, en un estudio realizado por Kaur *et al.* 2019 obtuvieron que la producción de biomasa fue mayor en los tratamientos sin encharcamiento en comparación con los tratamientos encharcados de 14 y 21 días en el cultivo de maíz. Por lo tanto, como el número de granos es el principal componente que explica el rendimiento en varios cultivos de grano, en este caso al perder la biomasa también se pierde el número de granos por ende se pierde el rendimiento, así mismo, cuando la disminución de biomasa ocurre alrededor de antesis se va a determinar el número de granos y si existe disminución en los mismos se debe a que el estrés afecto la división y elongación celular, tejidos que son sensibles y determinan el número de granos.

Así mismo en el presente estudio se observó que los períodos de exceso hídrico afectó el sistema radicular de todos los tratamientos en las diferentes etapas de crecimiento las mismas que llegaron a descomponerse a diferencia del control que no presentó daños, siendo así Maurel y Nacry (2020) nos dicen que los sistemas de raíces se ven directamente afectados cuando se produce el anegamiento, ya que son los primeros en sufrir la falta de oxígeno. La consecuencia de un sistema radicular dañado debido al anegamiento es el cierre de los estomas, lo que restringe la absorción de agua y nutrientes; esto dificultará el ingreso de dióxido de carbono a la hoja, así como la transpiración, favoreciendo la fotorrespiración, provocando el marchitamiento y la senescencia de la hoja, además de la inhibición de la fotosíntesis a medida que se reduce la expansión foliar, y disminuye la clorofila de las hojas, lo que conducirá a una menor acumulación de biomasa aérea, reduciendo así el peso del grano, el número de granos y el rendimiento del grano (Arguello *et al.*, 2016; Shao *et al.*, 2013; Voesenek & Sasidharan, 2013; Walne & Reddy, 2021).

En cuanto al rendimiento se obtuvo que los tratamientos de las etapas vegetativas y las etapas de antesis resultaron más afectadas obteniendo una reducción del 81 % en el T4 (mitad de antesis), posiblemente la reducción del rendimiento en las fases alrededor de antesis es debido a que se están afectando los procesos de fecundación, polinización, diferenciación de los tejidos, división celular y elongación celular en los primordios florales o en las estructuras que forman los granos ocasionando la disminución del rendimiento. Estos resultados coincidieron con los realizados de San Celedonio *et al.* (2014) los mismo que obtuvieron que las mayores pérdidas de rendimiento por anegamiento se presentaron en los tratamientos donde el exceso hídrico ocurrió en la antesis y en menor grado durante el

llenado de grano, en el cultivo de trigo presentó pérdidas en relación al control del 92 % y en cebada fueron del 79 %, la pérdida de rendimiento fue mayor a medida que el ciclo del cultivo avanzaba hasta la antesis; así mismo, Ploschuk *et al.* (2020) obtuvieron pérdidas en el rendimiento en condiciones tempranas (etapas vegetativas) de anegamiento reduciéndose el 85 % de los controles. Por lo cual Wu *et al.* (2015) dicen que el anegamiento que ocurre en diferentes etapas de desarrollo reduce el rendimiento de grano final del trigo, y el alcance de la reducción del rendimiento depende no solo de la gravedad del exceso hídrico, sino también de la etapa de desarrollo de la planta, así mismo esta reducción de las plantas anegadas alrededor de la antesis durante 16 días dan como resultado de menos granos por espiga.

Las reducciones en el rendimiento donde el mayor efecto por el exceso hídrico es en la antesis se debe principalmente a una disminución en el número de granos por espiga y al menor peso de los mil granos (Araki *et al.*, 2012; Ding *et al.*, 2020). Durante el período crítico (es decir, desde el alargamiento del tallo hasta la antesis) redujo el rendimiento tanto en los cultivares de trigo como en los de cebada como consecuencia de reducciones en el número de granos, en la cebada las reducciones en el rendimiento debido al anegamiento se debieron principalmente a una menor contribución del número de granos de los macollos y al número de espigas por planta (de San Celedonio *et al.*, 2014). Siendo así Arisnabarreta *et al.* (2010) nos dicen que las variaciones de rendimiento en trigo y cebada se relacionan positiva y linealmente con el número de granos determinado por planta, que se puede analizar como el producto entre el número de espigas por planta y el número de granos por espiga, durante el período previo a la antesis, los primordios de floretes en la espiga se diferencian primero y luego una proporción de ellos degenera y muere en coincidencia con el crecimiento activo de la espiga y el tallo por lo cual el número de flores que sobreviven define el número de granos por espiga.

En el presente estudio el peso de 1000 el T3 (inicio de antesis) fue el que presentó una disminución del 22 % en comparación con el control por lo cual, las etapas reproductivas fueron las más afectadas por el exceso hídrico. Esta pérdida del número de granos probablemente se dio por que se vio afectado el llenado de grano por las plantas que no lograron recuperarse en la etapa de antesis. Estos resultados coincidieron con los realizados por Ding *et al.* (2020) los mismos que obtuvieron que el exceso hídrico en la etapa S3 (antesis) disminuyó drásticamente el peso de 1000 granos la misma que el control presentó 42,7 g y la etapa S3 36,1 g. Así mismo Araki *et al.* (2012) obtuvieron pérdidas en el peso

de 1000 granos del 29 % en el cultivo de trigo respecto al control. Por lo cual atribuyeron que el anegamiento afectó seriamente el llenado normal del grano, resultando en una disminución del peso obteniendo granos más pequeños, también lo relacionaron a una mala removilización de los carbohidratos almacenados desde los culmos a los granos en el cultivo de maíz y trigo; así mismo, sugieren que la translocación no fue suficiente para cumplir con los granos previamente establecidos, finalmente en el cultivo de avena asocian esta disminución debido a una menor asimilación durante la recuperación o por la menor cantidad de recursos previos a la antesis que se removilizaron (Hossain *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2011; Ren *et al.*, 2014).

En cuanto al número de granos por planta se obtuvo que las etapas vegetativas hasta el T4 (mitad de antesis) son la más afectadas, estas pérdidas probablemente se deben a la reducción de la biomasa como se observa en la tabla 4, al afectarse la biomasa se pudo afectar la translocación de fotoasimilados y por lo tanto se afecta el número de granos, por otro lado el tratamiento más afectado fue la antesis debido a que afectó la formación de las flores y también se pudieron afectar las que ya se lograron diferenciarse ya que, en el caso de la quinua la flores de la panoja no todos se logran diferenciar al mismo tiempo si no de manera progresiva por lo cual, las flores que ya estaban diferenciadas pudieron abortar o morir afectando el número de granos. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Costa *et al.* (2020) los mismos obtuvieron en el cultivo de frijol que el número de granos por planta se ve afectado más en las etapas vegetativas con una reducción del 83 % lo que sugiere una mayor sensibilidad para mantener la productividad cuando la planta se encuentra en la fase de crecimiento vegetativo, así mismo de San Celedonio *et al.* (2018) observaron en el cultivo de cebada que el menor número de granos por planta es en la etapa WL4 (desde la hoja bandera completamente extendida hasta antesis) la misma que presento 82 granos por planta relativo al control que obtuvo 130 granos por planta, las reducciones en el número de granos por planta están fuertemente asociadas con disminuciones en el número de espigas por planta debido a la poca plasticidad de la espiga para establecer granos. Finalmente Slafer *et al.* (2015) nos dicen que el número final de granos establecidos también depende de la eficiencia con que se utilicen los recursos para cuajar granos por unidad de peso seco de espiga, razón que ha sido denominada eficiencia de fructificación

El índice de cosecha fue afectado en todos los tratamientos debido al exceso hídrico los mismo que fueron menores al control, el T4 (mitad de antesis) fue más penalizado el mismo que obtuvo 0,14 a diferencia del control con 0,44 observado que las etapas

vegetativas fueron más afectadas hasta antesis. Estos resultados coincidieron con los realizados por Ploschuk *et al.* (2021) los mismo que obtuvieron que el cultivo de cebada el control obtuvo 0,467 y en las etapas reproductivas el valor disminuye con 0,353 y en el cultivo de guisante el control obtuvo 0,441 y en las etapas reproductivas el valor fue de 0,149; siendo así, Arduini *et al.* (2016) nos dicen que en su estudio en el cultivo de trigo el IC disminuye como resultado de los diferentes niveles de reducción en las partes reproductivas y vegetativas de las plantas.

El presente estudio constituye las primeras evidencias de la respuesta de quinua ante el exceso hídrico demostrando que el cultivo es sensible durante todo su ciclo de crecimiento tanto vegetativo como reproductivo, con énfasis alrededor de la antesis donde se notó el mayor efecto en todas las variables de estudio, lo cual puede ser un punto de partida para nuevas investigaciones donde buscan identificar el periodo crítico ante el exceso hídrico en quinua.

8. Conclusiones

- El exceso hídrico afectó negativamente el crecimiento vegetal disminuyendo la altura de planta, la cobertura vegetal, el índice de área foliar y la biomasa vegetal, cuya magnitud depende del momento del estrés hídrico. La duración del ciclo del cultivo se adelantó 21 días cuando el exceso hídrico se aplicó después de antesis y se retrasó 23 días cuando los tratamientos se aplicaron antes de antesis.
- Bajo las condiciones del experimento se identificó el periodo crítico para el rendimiento de grano causado por exceso hídrico, este inicia desde los 41 hasta 96 días después de la siembra, que incluye desde las etapas vegetativas hasta final de antesis, la pérdida del rendimiento de grano está relacionada principalmente con la disminución la biomasa aérea y el número de granos.

9. Recomendaciones

- Realizar un seguimiento de la duración de la fenología del cultivo en cada tratamiento aplicado, para observar cómo varían los días en cada aplicación de exceso hídrico en comparación con el control.
- Realizar un estudio para explicar a nivel fisiológico qué está pasando con la planta para que se logre recuperar y tener mejor crecimiento que las demás.
- Evaluar el efecto del exceso hídrico en otras variedades de quinua para observar cuál es su respuesta y si tienen el mismo efecto que las estudiadas.
- Evaluar el efecto del exceso hídrico con distintas duraciones y así mismo aplicar en más etapas fenológicas vegetativas.
- Para poder evaluar la biomasa radicular es recomendable sacar la raíz cuando las plantas ya estén con el llenado de grano completo y no esperar hasta que estas se encuentren completamente amarillas.

10. Bibliografía

- Aguirre, Z. (2018). *Guía para identificar las familias botánicas del Ecuador*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28099.63522>
- Alandia, G., Rodriguez, J. P., Jacobsen, S.-E., Bazile, D., & Condori, B. (2020). Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. *Global Food Security*, 26, 100429. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100429>
- Aldana, F., García, P. N., & Fischer, G. (2014). Effect of waterlogging stress on the growth, development and symptomatology of cape gooseberry (*Physalis peruviana*L.) plants. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38(149), 393-400.
- Aly, A. A., Al-Barakah, F. N., & El-Mahrouky, M. A. (2018). Salinity Stress Promote Drought Tolerance of *Chenopodium Quinoa* Willd. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(11), 1331-1343. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1457160>
- Angeli, V., Miguel Silva, P., Crispim Massuela, D., Khan, M. W., Hamar, A., Khajehei, F., Graeff-Hönninger, S., & Piatti, C. (2020). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): An Overview of the Potentials of the “Golden Grain” and Socio-Economic and Environmental Aspects of Its Cultivation and Marketization. *Foods*, 9(2), 216. <https://doi.org/10.3390/foods9020216>
- Apolo-Apolo, O. E., Pérez-Ruiz, M., Martínez-Guanter, J., & Egea, G. (2020). A Mixed Data-Based Deep Neural Network to Estimate Leaf Area Index in Wheat Breeding Trials. *Agronomy*, 10(2), 175. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020175>
- Araki, H., Hamada, A., Hossain, Md. A., & Takahashi, T. (2012). Waterlogging at jointing and/or after anthesis in wheat induces early leaf senescence and impairs grain filling. *Field Crops Research*, 137, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.006>
- Arduini, I., Orlandi, C., Pampana, S., Masoni, A., Arduini, I., Orlandi, C., Pampana, S., & Masoni, A. (2016). Waterlogging at tillering affects spike and spikelet formation in wheat. *Crop and Pasture Science*, 67(7), 703-711. <https://doi.org/10.1071/CP15417>
- Arguello, M. N., Mason, R. E., Roberts, T. L., Subramanian, N., Acuña, A., Addison, C. K., Lozada, D. N., Miller, R. G., & Gbur, E. (2016). Performance of soft red winter wheat subjected to field soil waterlogging: Grain yield and yield components. *Field Crops Research*, 194, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.040>
- Arisnabarreta, S., Miralles, D. J., Arisnabarreta, S., & Miralles, D. J. (2010). Nitrogen and radiation effects during the active spike-growth phase on floret development and

- biomass partitioning in 2- and 6-rowed barley isolines. *Crop and Pasture Science*, 61(7), 578-587. <https://doi.org/10.1071/CP09292>
- Asher, A., Dagan, R., Galili, S., & Rubinovich, L. (2022). Effect of Row Spacing on Quinoa (*Chenopodium quinoa*) Growth, Yield, and Grain Quality under a Mediterranean Climate. *Agriculture*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091298>
- Benincasa, P., Reale, L., Cerri, M., Tedeschini, E., Tosti Giacomo, F. B., & Rosati, A. (2022). Nitrogen fertilization levels and timing affect the plasticity of yield components in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research*, 289, 108734. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108734>
- Bradford, K. J., & Yang, S. F. (1981). Physiological Responses of Plants to Waterlogging1. *HortScience*, 16(1), 25-30. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.16.1.25>
- Campos, C. (2018). *ACCESIONES DE QUINUA (Chenopodium quinoa Willd.) ECOTIPO ALTIPLANO EN CONDICIONES DE COSTA CENTRAL* [Tesis ingeniero Agrónomo, UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3558/campos-morales-carla-sofia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Campos, J., Acosta-Coral, K., & Paucar-Menacho, L. M. (2022). Quinoa (*Chenopodium quinoa*): Nutritional composition and bioactive compounds of grain and leaf, and impact of heat treatment and germination. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 209-220. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.019>
- Chagas, L., Keller, T., Paiva De Lima, R., Antônio Tormena, C., Veras De Lima, H., & Fabíola Balazero Giarola, N. (2021). Impacts of soil type and crop species on permanent wilting of plants. *Geoderma*, 384, 114798. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114798>
- Costa, B. G. P., Amâncio, B. C. S., Boas, L. V. V., Bastos, L. da S., Domiciano, D., & Marchiori, P. E. R. (2020). Waterlogging effects upon the phenological phases of common bean cultivar BRSMG-Uai. *Ciência e Agrotecnologia*, 44, e009520. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044009520>
- de San Celedonio, R. P., Abeledo, L. G., Mantese, A. I., & Miralles, D. J. (2017). Differential root and shoot biomass recovery in wheat and barley with transient waterlogging during preflowering. *Plant and Soil*, 417(1), 481-498. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3274-1>
- de San Celedonio, R. P., Abeledo, L. G., & Miralles, D. J. (2014). Identifying the critical period for waterlogging on yield and its components in wheat and barley. *Plant and Soil*, 378(1), 265-277. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2028-6>

- de San Celedonio, R. P., Abeledo, L. G., & Miralles, D. J. (2018). Physiological traits associated with reductions in grain number in wheat and barley under waterlogging. *Plant and Soil*, *429*(1), 469-481. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3708-4>
- Ding, J., Liang, P., Wu, P., Zhu, M., Li, C., Zhu, X., & Guo, W. (2020). Identifying the Critical Stage Near Anthesis for Waterlogging on Wheat Yield and Its Components in the Yangtze River Basin, China. *Agronomy*, *10*(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010130>
- FAO. (2011). *La quinua: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial*. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/aq287s/aq287s.pdf>
- FAO. (2016). *Guia de cultivo de la quinua*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. <https://www.fao.org/3/i5374s/i5374s.pdf>
- Farkas, Z., Varga-László, E., Anda, A., Veisz, O., & Varga, B. (2020). Effects of Waterlogging, Drought and Their Combination on Yield and Water-Use Efficiency of Five Hungarian Winter Wheat Varieties. *Water*, *12*(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/w12051318>
- Fries, A., Silva, K., Pucha-Cofrep, F., Oñate-Valdivieso, F., & Ochoa-Cueva, P. (2020). Water Balance and Soil Moisture Deficit of Different Vegetation Units under Semiarid Conditions in the Andes of Southern Ecuador. *Climate*, *8*(2), 30. <https://doi.org/10.3390/cli8020030>
- Garcia, N., da-Silva, C. J., Cocco, K. L. T., Pomagualli, D., de Oliveira, F. K., da Silva, J. V. L., de Oliveira, A. C. B., & Amarante, L. do. (2020). Waterlogging tolerance of five soybean genotypes through different physiological and biochemical mechanisms. *Environmental and Experimental Botany*, *172*, 103975. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.103975>
- Garcia-Parra, M., Roa, D., Stechauner, R., Molano, J. F., Bazile, D., & Plazas Leguizamon, N. (2020). Effect of temperature on the growth and development of quinoa plants (*Chenopodium quinoa* Willd.): A review on a global scale. *Sylwan*, *164*.
- Garrido, M., Silva, P., Silva, H., Muñoz, R., Baginsky, C., & Acevedo, E. (2013). Evaluación del rendimiento de nueve genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) bajo diferentes disponibilidades hídricas en ambiente mediterráneo. *Idesia (Arica)*, *31*(2), 69-76. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292013000200010>
- Ghobadi, M. E., Ghobadi, M., & Zebarjadi, A. (2017). Effect of waterlogging at different growth stages on some morphological traits of wheat varieties. *International Journal of Biometeorology*, *61*(4), 635-645. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1240-x>

- González, J., Gallardo, M., Hilal, M., Rosa, M., & Prado, F. (2009). Physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought and waterlogging stresses: Dry matter partitioning. *Botanical Studies*, 50, 35-42.
- Hernández, J. P., Díaz, E., & Cerana, J. (2018). *ESTIMACIÓN DEL PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE EN SUELOS DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11522.43206>
- Hinojosa, L., González, J., Barrios-Masias, F., Fuentes, F., & Murphy, K. (2018). Quinoa Abiotic Stress Responses: A Review. *Plants*, 7(4), 106. <https://doi.org/10.3390/plants7040106>
- Hinojosa, L., Leguizamo, A., Carpio, C., Muñoz, D., Mestanza, C., Ochoa, J., Castillo, C., Murillo, A., Villacrés, E., Monar, C., Pichazaca, N., & Murphy, K. (2021). Quinoa in Ecuador: Recent Advances under Global Expansion. *Plants*, 10(2), 298. <https://doi.org/10.3390/plants10020298>
- Hossain, Md. A., Araki, H., & Takahashi, T. (2011). Poor grain filling induced by waterlogging is similar to that in abnormal early ripening in wheat in Western Japan. *Field Crops Research*, 123(2), 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.05.005>
- Huisa, L. H., & Cairampoma, M. R. (2020). (*Un Modelo de Proyecto de Tesis de Grado Academico*) [Tesis de grado]. http://www.perulactea.com/wp-content/uploads/2020/08/HUANCA_Modelo_de_Pyto_Tesis_2020_-PDF.pdf
- INIAP. (2014). *RESPUESTAS DEL CULTIVO DE SOJA AL ANEGAMIENTO*. INIAP. http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/Ad_735.pdf
- Issa, O., Fghire, R., Anaya, F., Benlhabib, O., & Wahbi, S. (2019). Physiological and Morphological Responses of two Quinoa Cultivars (*Chenopodium quinoa* Willd.) to Drought Stress. *Gesunde Pflanzen*, 71(2), 123-133. <https://doi.org/10.1007/s10343-019-00460-y>
- Jaikishun, S., Li, W., Yang, Z., & Song, S. (2019). Quinoa: In Perspective of Global Challenges. *Agronomy*, 9(4), 176. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040176>
- Kaur, G., Zurweller, B., Motavalli, P. P., & Nelson, K. A. (2019). Screening Corn Hybrids for Soil Waterlogging Tolerance at an Early Growth Stage. *Agriculture*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/agriculture9020033>
- Kumar, P., Pal, M., Joshi, R., & Sairam, R. K. (2013). Yield, growth and physiological responses of mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] genotypes to waterlogging at vegetative stage. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 19(2), 209-220. <https://doi.org/10.1007/s12298-012-0153-3>

- Landy, L., & Lazo, M. D. L. (2018). Estudio de pre-factibilidad para la producción de quinua como alternativa de cultivo de los habitantes del sector de Perucho del Cantón Puellaro de la provincia de Pichincha. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, agosto. <https://www.eumed.net/rev/oel/2018/08/produccion-quinua-ecuador.html>
- Laurente, L. F., & Mamani, A. (2020). Modelamiento de la producción de quinua aplicando ARIMA en Puno-Perú. *Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 19(19), 205-230.
- Leiva, Carla Schmidt, Gonzalo Gajardo, & Alejandra Rodriguez. (2018). *Manual técnico productivo y económico para la producción de quínoa en la Región del Biobío, bajo condición actual y clima proyectado al 2030*. El Centro de información de Recursos Naturales. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/26798/PC21017.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Lesjak, J., & Calderini, D. F. (2017). Increased Night Temperature Negatively Affects Grain Yield, Biomass and Grain Number in Chilean Quinoa. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00352>
- Li, C., Jiang, D., Wollenweber, B., Li, Y., Dai, T., & Cao, W. (2011). Waterlogging pretreatment during vegetative growth improves tolerance to waterlogging after anthesis in wheat. *Plant Science*, 180(5), 672-678. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.01.009>
- Liu, K., Harrison, M. T., Ibrahim, A., Manik, S. M. N., Johnson, P., Tian, X., Meinke, H., & Zhou, M. (2020). Genetic factors increasing barley grain yields under soil waterlogging. *Food and Energy Security*, 9(4), e238. <https://doi.org/10.1002/fes3.238>
- Long, N. V. (2016). EFFECTS OF SALINITY STRESS ON GROWTH AND YIELD OF QUINOA. *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, 14(3). http://www1.vnua.edu.vn/tapchi/Upload/2642016-TC%20so%202.2016%20banbong4_02.pdf
- Loreti, E., Van Veen, H., & Perata, P. (2016). Plant responses to flooding stress. *Current Opinion in Plant Biology*, 33, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.06.005>
- Macana, Y. A. M., & Melo, M. A. R. (2010). El punto de marchitez permanente (PMP) en melina (*Gmelina arborea* L. Roxb) para la Costa Caribe colombiana ¿una característica para la selección de clones? *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 116-121. https://doi.org/10.21930/rcta.vol11_num2_art:201

- Marashi, S. K. (2014). *A comparative study of grain yield and yield components of wheat (Triticum aestivum L.) in response to waterlogging condition.*
- Marti, J., Savin, R., & Slafer, G. A. (2015). Wheat Yield as Affected by Length of Exposure to Waterlogging During Stem Elongation. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201(6), 473-486. <https://doi.org/10.1111/jac.12118>
- Martínez-Vilalta, J., Poyatos, R., Aguadé, D., Retana, J., & Mencuccini, M. (2014). A new look at water transport regulation in plants. *New Phytologist*, 204(1), 105-115. <https://doi.org/10.1111/nph.12912>
- Maurel, C., & Nacry, P. (2020). Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability. *Nature Plants*, 6(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0684-5>
- Montesinos, E. A. E. (2016). Adaptación del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa willd*) al cambio climático en los Andes del Perú. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 19(37), Article 37. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i37.12950>
- Niki, T., Yoshida, S., & Sakai, A. (1978). Studies on chilling injury in plant cells I. Ultrastructural changes associated with chilling injury in callus tissues of *Cornus stolonifera* L. *Plant and Cell Physiology*, 19(1), 139-148. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a075568>
- Pais, I. P., Moreira, R., Semedo, J. N., Ramalho, J. C., Lidon, F. C., Coutinho, J., Maças, B., & Scotti-Campos, P. (2023). Wheat Crop under Waterlogging: Potential Soil and Plant Effects. *Plants*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/plants12010149>
- Pais, I. P., Moreira, R., Semedo, J. N., Reboredo, F. H., Lidon, F. C., Maças, B., & Scotti-Campos, P. (2021). Effects of Waterlogging on Growth and Development of Bread Wheat Genotypes. *Biology and Life Sciences Forum*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/IECPS2021-11989>
- Pereira, I. P., Moreira, R., Semedo, J. N., Reboredo, F. H., Lidon, F. C., Maças, B., & Scotti-Campos, P. (2021). Effects of Waterlogging on Growth and Development of Bread Wheat Genotypes. *IECPS 2021*, 38. <https://doi.org/10.3390/IECPS2021-11989>
- Pineda, G. (2022). *“Efecto de la fertilización nitrogenada y la modificación de la radiación solar, sobre el crecimiento y rendimiento de la Quinoa en la Argelia, Loja”* [Título de grado, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/25970/1/Gabriela%20del%20Cisne%20Pineda%20Suquilanda.pdf>

- Ploschuk, R. A., Miralles, D. J., Colmer, T. D., & Striker, G. G. (2020). Waterlogging differentially affects yield and its components in wheat, barley, rapeseed and field pea depending on the timing of occurrence. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(3), 363-375. <https://doi.org/10.1111/jac.12396>
- Ploschuk, R. A., Miralles, D. J., & Striker, G. G. (2021). Early- And late-waterlogging differentially affect the yield of wheat, barley, oilseed rape and field pea through changes in leaf area index, radiation interception and radiation use efficiency. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(3), 504-520. <https://doi.org/10.1111/jac.12486>
- Prieto, I., Armas, C., & Pugnaire, F. I. (2012). Water release through plant roots: New insights into its consequences at the plant and ecosystem level. *New Phytologist*, 193(4), 830-841. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.04039.x>
- Ren, B., Zhang, J., Dong, S., Liu, P., & Zhao, B. (2016). Effects of Waterlogging on Leaf Mesophyll Cell Ultrastructure and Photosynthetic Characteristics of Summer Maize. *PLOS ONE*, 11(9), e0161424. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161424>
- Ren, B., Zhang, J., Li, X., Fan, X., Dong, S., Liu, P., & Zhao, B. (2014). Effects of waterlogging on the yield and growth of summer maize under field conditions. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(1), 23-31. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-175>
- Robertson, D., Zhang, H., Palta, J. A., Colmer, T., Turner, N. C., Robertson, D., Zhang, H., Palta, J. A., Colmer, T., & Turner, N. C. (2009). Waterlogging affects the growth, development of tillers, and yield of wheat through a severe, but transient, N deficiency. *Crop and Pasture Science*, 60(6), 578-586. <https://doi.org/10.1071/CP08440>
- Robles-Bermúdez, A., Rodríguez-Maciél, J. C., Lagunes-Tejeda, Á., Gómez-Aguilar, R., Gutiérrez-Espinosa, J. A., Díaz-Gómez, O., & Martínez-Cárdenas, L. (2012). Giberelinas, citocininas y protector floral en la calidad de la flor de rosal (*Rosa x Hybrida*). *Bioagro*, 24(1), 45-50.
- Romero, R., Silva, P., & Seguel, O. (2016). Anegamiento y su efecto sobre la fisiología, crecimiento y rendimiento de trigo en zonas mediterráneas manejadas en cero labranza. *Agro Sur*, 44(1), 47-57. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2016.v44n1-05>
- Sadras, V. O., & Slafer, G. A. (2012). Environmental modulation of yield components in cereals: Heritabilities reveal a hierarchy of phenotypic plasticities. *Field Crops Research*, 127, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.014>
- Shao, G. C., Lan, J. J., Yu, S. E., Liu, N., Guo, R. Q., & She, D. L. (2013). Photosynthesis and growth of winter wheat in response to waterlogging at different growth stages. *Photosynthetica*, 51(3), 429-437. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0039-9>

- Shiu, O. Y., Oetiker, J. H., Yip, W. K., & Yang, S. F. (1998). The promoter of LE-ACS7, an early flooding-induced 1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase gene of the tomato, is tagged by a Sol3 transposon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(17), 10334-10339. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.17.10334>
- Sipa. (2021). *RENDIMIENOS OBJETIVOS DE QUINUA*. Ministerio de Agricultura y Ganaderia Sistema de Información Pública Agropecuaria. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/informe-de-rendimientos-objetivos/rendimiento-de-quinua>
- Slafer, G. A., Elia, M., Savin, R., García, G. A., Terrile, I. I., Ferrante, A., Miralles, D. J., & González, F. G. (2015). Fruiting efficiency: An alternative trait to further rise wheat yield. *Food and Energy Security*, 4(2), 92-109. <https://doi.org/10.1002/fes3.59>
- Sosa-Zuniga, V., Brito, V., Fuentes, F., & Steinfort, U. (2017). Phenological growth stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on the BBCH scale: Phenological scale for quinoa. *Annals of Applied Biology*, 171(1), 117-124. <https://doi.org/10.1111/aab.12358>
- Tian, L., Bi, W., Ren, X., Li, W., Sun, L., & Li, J. (2020). Flooding has more adverse effects on the stem structure and yield of spring maize (*Zea mays* L.) than waterlogging in Northeast China. *European Journal of Agronomy*, 117, 126054. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126054>
- Vidueiros, S. M., Curti, R. N., Dyner, L. M., Binaghi, M. J., Peterson, G., Bertero, H. D., & Pallaro, A. N. (2015). Diversity and interrelationships in nutritional traits in cultivated quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) from Northwest Argentina. *Journal of Cereal Science*, 62, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.01.001>
- Villa, B. D., Petry, M. T., Santos, M. S. N. D., Martins, J. D., Lago, I., Moura, M. B. D., Eggers, H. S., Melo, G. L., Tonetto, F., Ferrazza, C. M., Gonçalves, A. F., Magalhães, T. F., & Castro, I. A. D. (2022). Water Deficit and Excess and the Main Physiological Disorders in Agricultural Crops. *Journal of Agricultural Science*, 14(8), 166. <https://doi.org/10.5539/jas.v14n8p166>
- Villavicencio, E. (2018). “*PERIODO CRÍTICO PARA EL RENDIMIENTO Y LA CALIDAD DEL GRANO DE QUINUA (Chenopodium quinoa Willd.) MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SOMBRA EN DISTINTOS ESTADOS FENOLÓGICOS, EN EL SECTOR LA ARGELIA, LOJA*” [Tesis ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Loja]. https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/24449/1/EdwinIsrael_VillavicencioSanchez.pdf

- Voesenek, L. a. C. J., & Sasidharan, R. (2013). Ethylene – and oxygen signalling – drive plant survival during flooding. *Plant Biology*, *15*(3), 426-435. <https://doi.org/10.1111/plb.12014>
- Walne, C. H., & Reddy, K. R. (2021). Developing Functional Relationships between Soil Waterlogging and Corn Shoot and Root Growth and Development. *Plants*, *10*(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/plants10102095>
- Wu, J., Wang, J., Hui, W., Zhao, F., Wang, P., Su, C., & Gong, W. (2022). Physiology of Plant Responses to Water Stress and Related Genes: A Review. *Forests*, *13*(2), 324. <https://doi.org/10.3390/f13020324>
- Wu, X., Tang, Y., Li, C., Wu, C., & Huang, G. (2015). Chlorophyll Fluorescence and Yield Responses of Winter Wheat to Waterlogging at Different Growth Stages. *Plant Production Science*, *18*(3), 284-294. <https://doi.org/10.1626/pps.18.284>
- Xu, S., Li, J., Zhang, X., Wei, H., & Cui, L. (2006). Effects of heat acclimation pretreatment on changes of membrane lipid peroxidation, antioxidant metabolites, and ultrastructure of chloroplasts in two cool-season turfgrass species under heat stress. *Environmental and Experimental Botany*, *56*(3), 274-285. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.03.002>
- Ye, H., Song, L., Chen, H., Valliyodan, B., Cheng, P., Ali, L., Vuong, T., Wu, C., Orlowski, J., Buckley, B., Chen, P., Shannon, J. G., & Nguyen, H. T. (2018). A major natural genetic variation associated with root system architecture and plasticity improves waterlogging tolerance and yield in soybean. *Plant, Cell & Environment*. <https://doi.org/10.1111/pce.13190>
- Zhang, F., Zhu, K., Wang, Y. Q., Zhang, Z. P., Lu, F., Yu, H. Q., & Zou, J. Q. (2019). Changes in photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of sorghum under drought and waterlogging stress. *Photosynthetica*, *57*(4), 1156-1164. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.136>

11. Anexos

Anexo 1. Descripción de los estados fenológicos de crecimiento de quinua (*Chenopodium quinoa*) según la escala BBCH ampliada.

Código BBCH Dos dígitos	Descripción
Etapa de crecimiento principal 0: germinación	
00	Siembra
01	Inicio de la imbibición de las semillas
03	Finalizada la imbibición de semillas
05	Emergencia de la radícula de la semilla
07	Aparición del hipocótilo
08	Hipocótilo con cotiledones creciendo hacia la superficie del suelo
09	Emergencia de los cotiledones a través del suelo
Etapa principal de crecimiento 1: desarrollo foliar	
10	Cotiledones completamente emergidos
11	Primer par de hojas visibles
12	Segundo par de hojas visibles
1.	La codificación continúa con el mismo esquema
19	Nueve pares de hojas visibles.
Estado de desarrollo principal 2: formación de brotes laterales	
20	Yemas laterales visibles u hojas expandidas sin tallos laterales
21	Un brote lateral visible
22	Dos brotes laterales visibles
2.	La codificación continúa con el mismo esquema
29	Nueve brotes laterales visibles
Estado principal de desarrollo 3: alargamiento del tallo (omitido)	
Estado principal de desarrollo 4: desarrollo de las partes vegetativas cosechables (omitido)	
Estado principal de desarrollo 5: aparición de la inflorescencia	
50	Inflorescencia presente pero aún encerrada por las hojas.
51	Hojas que rodean la inflorescencia separada, la inflorescencia es visible desde arriba.
59	Inflorescencia visible, pero todas las flores siguen cerradas
Estado de crecimiento principal 6: floración.	
60	Comienzo de la antesis: inflorescencia principal de las flores con las primeras anteras extruidas.
67	Comienzo de la antesis: principal inflorescencia de las flores con las primeras anteras senescentes
69	Antesis completa: flores principales inflorescentes con anteras senescentes
Estado principal de desarrollo 7: desarrollo del fruto	

70	Cuajado: engrosamiento del ovario y primeros granos visibles en el tallo principal
Estado de desarrollo principal 8: maduración	
81	Grano lechoso, fácil de aplastar con las uñas, contenido líquido y pericarpio verde.
85	Grano grueso, fácil de aplastar con las uñas, contenido pastoso blanco, pericarpio verde, beige, rojo o negro.
89	Grano maduro, difícil de aplastar con las uñas, contenido seco, el grano tiene un color beige, rojo o negro en su exterior. Listo para cosechar.
Fase principal de crecimiento 9: senescencia	
91	Sólo las hojas basales están secas
93	Las hojas de la primera mitad de la planta, empezando por la base, están muertas
95	Todas las hojas están muertas; el color del tallo pasa de amarillo a marrón
97	Planta muerta y seca
99	Producto cosechado

Fuente: (Sosa-Zuniga *et al.*, 2017).

Anexo 2. Altura de las plantas de quinua en (cm) a partir de los 42 DDS hasta los 146 DDS en función de periodos sometidos a exceso hídrico.

Tratamiento	Día 42	Día 53	Día 64	Día 91	108	Día 117	Día 132	Día 146
T1 (BBCH 25)	33,50	37,30 B	43,50 C	94,00 B	140,30 B	164,50 B	193,00 A B	197,50 A B
T2 (BBCH 50)	32,68	56,76 A	68,50 B	117,14 B	141,40 B	153,62 B	164,70 B	164,72 B
T3 (BBCH60)	29,54	53,60 A	87,06 A	168,08 A	179,87 A B	182,37 A B	182,60 A B	182,62 A B
T4 (BBCH 67)	31,32	54,88 A	89,05 A	194,05 A	214,20 A	217,40 A	217,40 A	217,40 A
T5 (BBCH 70)	29,64	47,36 A B	84,20 A B	164,10 A	201,40 A	207,40 A	207,40 A	207,42 A
T6 (BBCH 85)	28,50	51,06 A	88,50 A	189,40 A	210,90 A	216,00 A	216,00 A	216,00 A
Control	30,30	52,37 A	89,63 A	186,60 A	208,99 A	217,90 A	217,90 A	217,90 A
Exceso hídrico	ns	***	***	***	***	***	***	***

Las letras en sentido vertical indican las diferencias estadísticamente significativas Tukey ($p < 0,05$). Los valores son la media de 5 repeticiones; (ns) efecto no significativo, (***) efecto significativo $p < 0,001$.

Anexo 3. Diámetro del tallo de las plantas de quinua en (cm) a partir de los 42 DDS hasta los 146 DDS en función de periodos sometidos a exceso hídrico.

Tratamiento	Día 42	Día 53	Día 64	Día 91	Día 108	Día 117	Día 132	Día 146
T1 (BBCH 25)		0,6	0,6	0,7	1	1,3	1,5 1,6 A	1,6 A
T2 (BBCH 50)		0,5	0,6	0,7	1	1,2	1,2 1,2 B	1,2 B
T3 (BBCH60)		0,5	0,6	0,8	1	1,1	1,1 1,1 B	1,1 B
T4 (BBCH 67)		0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,2 1,2 B	1,2 B
T5 (BBCH 70)		0,5	0,6	0,8	1	1,1	1,2 1,2 B	1,2 B
T6 (BBCH 85)		0,5	0,6	0,8	1,1	1,2	1,2 1,2 B	1,2 B
Control		0,5	0,7	0,8	1,1	1,2	1,2 1,2 B	1,2 B
Exceso hídrico	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	**

Las Letras en sentido vertical indican las diferencias estadísticamente significativas Tukey ($p < 0,05$). Los valores son la media de 5 repeticiones; (ns) efecto no significativo, (**) efecto significativo $p < 0,01$.

Anexo 4. Cobertura vegetal de las plantas de quinua desde los 42 DDS hasta los 146 DDS en función del periodo sometido a exceso hídrico.

Tratamiento	Día 42	Día 53	Día 64	Día 91	108	Día 117	Día 132	Día 146
T1 (BBCH 25)	29,24	2,17 B	7,83 B	20,67 B	33,28 B	33,28 B	50,58 A B	54,71 A
T2 (BBCH 50)	27,26	32,45 A	6,52 B	20,13 B	26,36 B	26,36 C	41,30 B C	42,76 B
T3 (BBCH60)	25,12	36,07 A	38,44 A	21,28 B	15,61 C	15,61 D	13,72 E	9,15 D
T4 (BBCH 67)	25,50	37,03 A	42,61 A	50,67 A	30,36 B	30,36 D	21,25 D E	13,03 C D
T5 (BBCH 70)	26,01	38,51 A	43,83 A	50,53 A	36,39 A	36,39 C	24,20 D	13,69 C D
T6 (BBCH 85)	23,20	34,99 A	43,15 A	50,26 A	53,75 A	53,75 A	34,30 C	19,64 C
Control	24,77	37,15 A	43,71 A	50,49 A	53,36 A	55,43 A	52,77 A	50,94 A
Exceso hídrico	ns	***	***	***	***	***	***	***

Las letras en sentido vertical indican las diferencias estadísticamente significativas Tukey ($p < 0,05$). Los valores son la media de 5 repeticiones; (ns) efecto no significativo, (***) efecto significativo $p < 0,001$.

Anexo 5. Contenido de clorofila de las plantas de quinua desde los 42 hasta los 156 DDS en función del periodo de exceso hídrico.

Tratamiento	Día 42	Día 53	Día 64	Día 91	108	Día 117	Día 132	Día 146
T1 (BBCH 25)	41,0	43,4	39,80 A B	44,30 B	49,35 A	50,30 A B	54,65 A	53,55 A
T2 (BBCH 50)	43,8	45,3	30,80 B	50,60 A	51,80 A	51,36 A B	53,26 A	49,16 A B
T3 (BBCH60)	44,1	46,2	38,38 A B	9,82 C	33,10 B	36,05 C	33,10 C	26,70 C
T4 (BBCH 67)	43,7	48,3	43,16 A	48,96 A B	25,42 B	16,10 D	34,12 C	11,14 D
T5 (BBCH 70)	45,0	49,6	42,32 A	47,52 A B	52,70 A	45,38 B	26,20 D	13,80 D
T6 (BBCH 85)	45,4	46,7	37,50 A B	47,18 A B	51,26 A	52,50 A	46,24 B	21,36 C
Control	43,7	46,8	40,73 A	48,57 A B	52,82 A	53,59 A	56,05 A	46,09 B
Exceso hídrico	ns	ns	**	***	***	***	***	***

Las letras en sentido vertical indican las diferencias estadísticamente significativas Tukey ($p < 0,05$). Los valores son la media de 5 repeticiones; (ns) efecto no significativo, (**) efecto significativo $p < 0,01$, (***) efecto significativo $p < 0,001$.

Anexo 6. Índice de área foliar de las plantas de quinua evaluadas desde los 60 hasta los 144 DDS en función de periodos de exceso hídrico.

Tratamiento	Día 60	Día 74	Día 88	Día 102	Día 117	Día 130	Día 144
T1 (BBCH 25)	0,07 A	1,16 A	0,28 A	0,29 B	0,53 C	0,57 C	0,62 D
T2 (BBCH 50)	0,93 B	0,18 A	0,44 A	0,44 B	0,54 C	0,52 C	0,49 C
T3 (BBCH60)	1,44 C D	0,37 B	0,58 A	0,23 A	0,25 A B	0,15 A	0,09 A
T4 (BBCH 67)	1,33 C	1,10 B	1,07 B	0,42 B	0,21 A	0,15 A	0,11 A
T5 (BBCH 70)	1,60 D	1,19 B	1,12 B	0,80 C	0,45 B C	0,23 A B	0,16 A B
T6 (BBCH 85)	1,48 C D	1,25 B	0,88 B	0,66 C	0,55 C	0,30 B	0,22 B
Control	1,45 C D	1,16 B	1,13 B	0,80 C	0,65 C	0,65 D	0,52 C
Exceso hídrico	***	***	***	***	***	***	***

Las letras en sentido vertical indican las diferencias estadísticamente significativas Tukey ($p < 0,05$). Los valores son la media de 5 repeticiones; (***) efecto significativo $p < 0,001$.

Anexo 10. Preparación del sustrato a base de tierra, arena y compost.



Anexo 8. Aparición de las primeras hojas verdaderas.



Anexo 11. Visita de director de tesis para explicar el funcionamiento de los equipos.



Anexo 9. Siembra de 3 semillas de quinua por funda.



Anexo 7. Aplicación de la fertilización en el cultivo.



Anexo 12. Aplicación de los diferentes tratamientos.



Anexo 14. Medición de la altura.



Anexo 13. Medición del diámetro.



Anexo 15. Efecto del exceso hídrico en el primer tratamiento.



Anexo 16. Aparición del botón floral.



Anexo 17. Medición del contenido de clorofila con el SPAD.



Anexo 18. Medición de la altura en los últimos tratamientos.



Anexo 20. Utilización de la cámara Go pro9 para medir IAF.



Anexo 19. Efecto de las plantas impuestas a exceso hídrico en la etapa de mitad de anthesis.



Anexo 21. Proporcionar agua a los baldes para mantener el agua igual a la superficie del sustrato.



Anexo 22. Observación de las plantas de quinua en etapa vegetativa.



Anexo 24. Observación de las plantas de quinua en madurez de cosecha.



Anexo 23. Cosecha de las plantas de quinua.



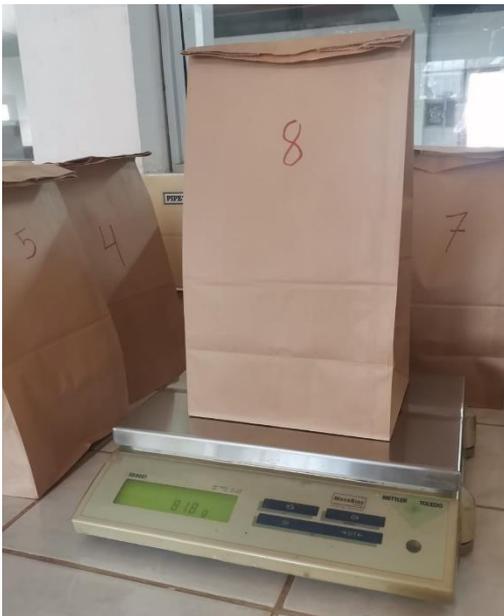
Anexo 26. Separación de las diferentes partes de la planta para llevar a la estufa.



Anexo 25. Colocación de las diferentes partes de la planta de quinua a fundas de papel.



Anexo 28. Peso de las fundas de papel con quinua después de sacar de la estufa en la balanza gramera.



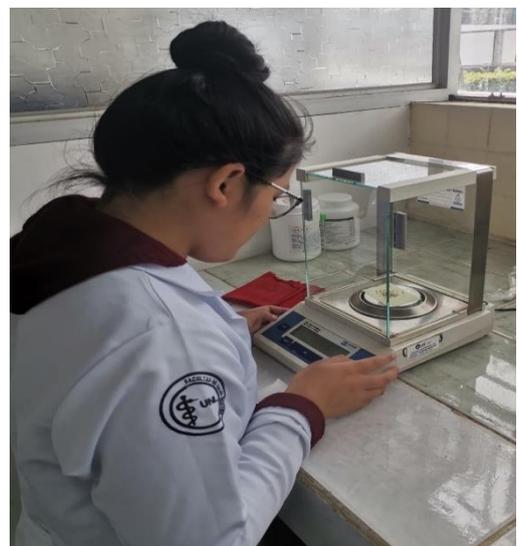
Anexo 27. Colocación de las fundas con quinua en la estufa.



Anexo 30. Conteo de 100 granos.



Anexo 29. Peso de 100 granos.



Anexo 32. Peso del número total de granos.



Anexo 31. Limpieza de los granos mediante tamizadores.



Anexo 33. Colocación y obtención de los granos en la máquina limpiadora de quinua.



- **Cálculo de N para el ensayo (4.05 m²):**

$$\begin{array}{r} 160 \text{ kg / ha} \\ \times \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 10000 \text{ m}^2 \\ \\ 4.05 \text{ m}^2 \end{array}$$

$$\mathbf{x = 0.065 \text{ kg de Urea}}$$

TRANSFORMAR EN GRAMOS:

$$0.065 \text{ kg} \times 1000 = 65 \text{ gr/ N}$$

1.2. Fosforo (P)

No se requiere dosis de corrección

Requerimiento de P para el ensayo (4.05 m²):

$$\begin{array}{r} 80 \text{ kg/ha} \\ \times \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 10000 \text{ m}^2 \\ \\ 4.05 \text{ m}^2 \end{array}$$

$$\mathbf{X = 0.76 \text{ kg de P}_2\text{O}_5}$$

1.2.1. Cálculo de fosforo por hectárea

Fertilizante: Superfosfato triple 46% de P₂O₅

$$\begin{array}{r} 100 \text{ kg / ha} \\ \times \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 46 \text{ P}_2\text{O}_5 \\ \\ 80 \text{ kg /P} \end{array}$$

$$\mathbf{x = 174 \text{ kg/ha de P}_2\text{O}_5}$$

- **Cálculo de fosforo para el ensayo (4.05 m²):**

$$\begin{array}{r} 174 \text{ kg / ha} \\ \times \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 10000 \text{ m}^2 \\ \\ 4.05 \text{ m}^2 \end{array}$$

$$\mathbf{x = 0.07 \text{ kg de P}}$$

Transformar en gramos: 0.07 kg x 1000 = 70 gr/K

1.3. Potasio (K)

CIC → 11.54

$$11.54 \qquad 100\%$$

$$0.10 \qquad x$$

$$x = 0.86 \% \text{ de déficit}$$

$$K = 2\% - 0.86 = 1.14 \text{ de déficit}$$

Déficit de K:

$$\% \text{ déficit de K } \left(\frac{mg}{kg} \right) = CIC \times \left(\% \frac{deficit}{100} \right) \times 390 \text{ mg de kmol}$$

$$= 11.54 \times \left(\frac{1.14}{100} \right) \times 390$$

$$= 51.3 \text{ mg/kg}$$

Dosis de K₂O (kg/ha)

$$= \frac{mg}{kg} \times prof. (m) \times Da \left(\frac{g}{cm^3} \right) \times \frac{10}{0.32}$$

$$= \left(\frac{20 \text{ mg}}{kg} \right) \times 0.2 \times 1.1 \times \frac{10}{0.32}$$

$$= 137.5 \text{ kg/ha}$$

- **Cálculo de K para el ensayo (4.05 m²):**

Fertilizante: muriato de potasio 60%

Dosis de corrección: 137.5 kg/ha

$$64 + 137.5 = 201.5 \text{ kg/ha}$$

$$\begin{array}{r} \bullet \quad 100 \text{ kg} \qquad 60 \text{ kg/ha} \\ \qquad \qquad \qquad \times \qquad \qquad \qquad 201.5 \text{ kg/ha} \end{array}$$

$$x = 335.8 \text{ kg/ha}$$

$$\bullet \quad \begin{array}{r} 10000 \text{ m}_2 \qquad 335.8 \text{ kg/ha} \\ \qquad \qquad \qquad 4.05 \text{ m}_2 \qquad \qquad \qquad \times \end{array}$$

$$x = 0.136 \text{ kg / ha}$$

Transformar en gramos: 0.14 kg x 1000 = 136 gr/K

2. Cálculo de cal agrícola en el encalado de corrección

a) Cálculo de la dosis de cal (pH a alcanzar y el pH actual)

pH que se desea alcanzar.....7

pH del suelo (actual).....5,96

Diferencia de pH1,04

b) Dosis de Cal agrícola

$$1,04 \times 8300 = 8632 \text{ kg / ha: } 0,9 \text{ kg/ m}^2$$

Resumen de las dosis de fertilizante

Fertilizante	Dosis fertilizante (kg/ha)	1 Apl (30%)	2 Apl. (70%)	Dosis parcela (kg/parcela)	Dosis (g/parcela)	1 Apl (30%)	2 Apl. (70%)
Urea	160	48	112	0,065	65	19	45
Superfosfato triple	174	52	122	0,070	70	21	49
Muriato de potasio	336	101	235	0,136	136	41	95

Anexo 35. Certificado de traducción del resumen.

Loja, 20 de noviembre del 2023

Patricio Ivan Tenezaca Quinde

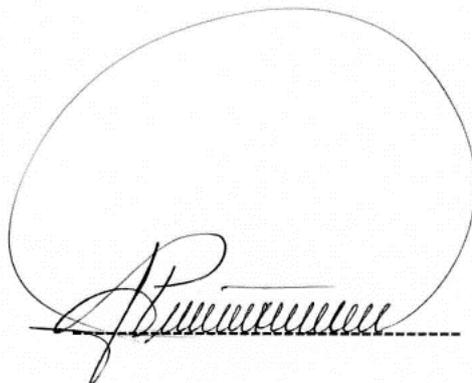
Licenciado en Ciencias de la Educación en la Especialidad del Idioma Inglés

Reg. SENESCYT: 1008-2016-1656763

CERTIFICO:

Que he realizado la traducción de español a inglés del resumen de: **“Determinación del periodo crítico para el exceso hídrico y su influencia sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo condiciones controladas”**, de autoría de la Srta, **Katty Carolina Loja Zhigui** con número de cédula 1150111647, estudiante de la Carrera de Agronomía de la Universidad Nacional de Loja.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al interesado hacer uso del presente en lo que considere conveniente.



Lcdo. Patricio Ivan Tenezaca Quinde

1102714530