

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA TRES
VARIEDADES DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) EN LA
LOCALIDAD DE TARACO, PUNO”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA AGRÓNOMA

GREYS LASTENIA OTINIANO MEGO

LIMA-PERÚ

2022

La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**“CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA TRES VARIEDADES DE
QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) EN LA LOCALIDAD DE TARACO, PUNO”**

Presentado por:

GREYS LASTENIA OTINIANO MEGO

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AGRÓNOMA**

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

**Dr. Javier Arias Carbajal
PRESIDENTE**

**Ing. Mg. Sc. Carlos J. Mestanza Novoa
MIEMBRO**

**Ing. Mg. Sc. Karín C. Coronado Matutti
MIEMBRO**

**Dr. Percy E. Zorogastúa Cruz
ASESOR**

**Ing. Wilfredo J. Yzarra Tito
CO-ASESOR**

Lima – Perú

2022

DEDICATORIA

A mi mamá Norith, por apoyarme
y alentarme en cada momento
necesario, por enseñarme en cada
acción su gran fortaleza para
seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi), que a través del proyecto: “Evaluación integral de los impactos del cambio climático en los cultivos de seguridad alimentaria en la región del Altiplano: caso cultivo de quinua”, financió el presente trabajo de investigación.

A mis estimadas y estimados colegas de la Subdirección de Predicción Agrometeorológica, por las enseñanzas y facilidades para realizar mi tesis.

A mis apreciadas amistades cercanas, por sus consejos y palabras de motivación constante.

A mi estimado jurado por el tiempo, dedicación y sugerencias para mejorar mi tesis.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN	11
II. REVISIÓN DE LITERATURA	13
2.1. ÁREA DE ESTUDIO	13
2.1.1. UBICACIÓN Y LÍMITES	13
2.2. CULTIVO DE QUINUA.....	15
2.2.1. TAXONOMÍA.....	15
2.2.2. MORFOLOGÍA.....	15
2.2.3. FENOLOGÍA	16
2.2.4. VARIEDADES DE QUINUA.....	19
2.2.5. FISIOLOGÍA DE LAS PLANTAS A CONDICIONES DE ESTRÉS	22
2.2.6. REQUERIMIENTOS DEL CULTIVO.....	26
2.3. MODELO	28
2.3.1. ANTECEDENTES CON EL USO DEL MODELO AQUACROP	28
2.3.2. MODELO AQUACROP	31
2.3.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN.....	38
III. METODOLOGÍA	40
3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN.....	40
3.1.1. ANÁLISIS DE SUELOS.....	41
3.1.2. INFORMACIÓN CLIMÁTICA.....	43
3.2. CAMPO DE QUINUA	43
3.2.1. MATERIAL GENÉTICO.....	43
3.2.2. MATERIALES DE CAMPO	43
3.2.3. EQUIPOS DE LABORATORIO	43
3.2.4. MANEJO DEL CULTIVO.....	44
3.2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL	46
3.2.6. RECOLECCIÓN DE DATOS PARA VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN.....	47
3.2.7. PROGRAMAS INFORMÁTICOS	50
3.2.8. MÉTODOS	50
3.3. MODELO AQUACROP	52

3.3.1.	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS EN EL MODELO AQUACROP	52
3.3.2.	CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP	52
3.3.3.	VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP	53
3.3.4.	CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL MODELO AQUACROP	53
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1.	EVALUACIONES DE FENOLOGÍA Y DE RENDIMIENTO DEL CULTIVO	55
4.1.1.	NÚMERO DE DÍAS A LA EMERGENCIA	55
4.1.2.	NÚMERO DE DÍAS A LA FLORACIÓN	57
4.1.3.	NÚMERO DE DÍAS A LA FORMACIÓN DE GRANO PASTOSO	58
4.1.4.	NÚMERO DE DÍAS A LA MADURACIÓN DE COSECHA	59
4.1.5.	BIOMASA SECA AÉREA	61
4.1.6.	RENDIMIENTO	62
4.2.	CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP	64
4.3.	VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP	74
V.	CONCLUSIONES	82
VI.	RECOMENDACIONES	83
VII.	BIBLIOGRAFÍA	84
VIII.	ANEXOS	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variedades comerciales de quinua en el Perú	20
Tabla 2: Descripción general de la variedad INIA 415-Pasankalla.....	21
Tabla 3: Descripción general de la variedad Salcedo INIA	21
Tabla 4: Descripción general de la variedad Blanca de Juli	22
Tabla 5: Análisis de caracterización del suelo del área experimental Taraco, Puno-2018 .	41
Tabla 6: Cronograma de labores realizadas en las parcelas de calibración.....	44
Tabla 7: Cronograma de labores realizadas en las parcelas de validación.....	45
Tabla 8: Características de las parcelas experimentales de calibración	50
Tabla 9: Características de las parcelas experimentales de validación	50
Tabla 10: Descripción de parámetros del modelo AquaCrop.....	52
Tabla 11: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la emergencia de las parcelas de calibración.....	56
Tabla 12: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la emergencia de las parcelas de validación	56
Tabla 13: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la floración de las parcelas de calibración.....	58
Tabla 14: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la floración de las parcelas de validación	58
Tabla 15: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la formación de grano pastoso de las parcelas de calibración.....	59
Tabla 16: Valor medio, mínimo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la formación de grano pastoso de las parcelas de validación	59
Tabla 17: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la maduración de las parcelas de calibración	60
Tabla 18: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la maduración de las parcelas de validación.....	60
Tabla 19: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad de la biomasa seca área ($Mg \cdot ha^{-1}$) medida en todo el cultivo cada 30 días de las parcelas de calibración	61
Tabla 20: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad de la biomasa seca área ($Mg \cdot ha^{-1}$) medida en todo el cultivo cada 30 días de las parcelas de validación.....	62

Tabla 21: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del rendimiento de grano ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de las parcelas de calibración.....	63
Tabla 22: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del rendimiento de grano ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de las parcelas de validación.....	64
Tabla 23: Valores predeterminados y parámetros calibrados en el modelo AquaCrop para las tres variedades del cultivo de quinua	66
Tabla 24: Indicadores estadísticos de eficiencia en la calibración cuando se compara los valores observados y simulados de la cobertura del dosel (%) y la biomasa seca aérea ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).....	67
Tabla 25: Indicadores estadísticos de eficiencia en la validación cuando se compara los valores observados y simulados de la cobertura del dosel (%) y la biomasa seca aérea ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación y límites de Taraco	14
Figura 2: Representación esquemática del modelo AquaCrop.....	32
Figura 3: Datos de entrada que definen el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo	33
Figura 4: Ubicación del área experimental.....	40
Figura 5: Estimación de la cobertura vegetal con el uso del <i>Canopy Cover</i> Imagen real (a) e imagen procesada (b).....	48
Figura 6: Evaluación tomadas en campo con fecha 16/12/2018 (a), 30/12/2018 (b), 5/01/2018 (c) y 17/01/2018 (d).....	49
Figura 7: Distribución de las parcelas experimentales para tres variedades de quinua (Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli).....	51
Figura 8: Cobertura del dosel (CC) simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la calibración de la variedad Pasankalla	68
Figura 9: Cobertura del dosel simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la calibración de la variedad Salcedo INIA	69
Figura 10: Cobertura del dosel simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la calibración de la variedad Blanca de Juli	70
Figura 11: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la calibración de la variedad Pasankalla	71
Figura 12: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la calibración de la variedad Salcedo INIA	72
Figura 13: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la calibración de la variedad Blanca de Juli.....	73
Figura 14: Cobertura del dosel (CC) simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la validación de la variedad Pasankalla	76
Figura 15: Cobertura del dosel (CC) simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la validación de la variedad Salcedo INIA	77
Figura 16: Cobertura del dosel (CC) simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la validación de la variedad Blanca de Juli.....	78
Figura 17: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la validación de la variedad Pasankalla	79
Figura 18: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la validación de la variedad Salcedo INIA	80

Figura 19: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la validación de la
variedad Blanca de Juli..... 81

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: LISTA DE ABREVIATURAS.....	93
ANEXO 2: PRUEBA DE KRUSKAL WALLIS DE DÍAS A LA EMERGENCIA EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN	95
ANEXO 3: PRUEBA DE KRUSKAL WALLIS DE DÍAS A LA EMERGENCIA EN PARCELAS DE VALIDACIÓN	95
ANEXO 4: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA FLORACIÓN EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN.....	95
ANEXO 5: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA FLORACIÓN EN PARCELAS DE VALIDACIÓN.....	96
ANEXO 6: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA FORMACIÓN DE GRANO PASTOSO EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN	96
ANEXO 7: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA FORMACIÓN DE GRANO PASTOSO EN PARCELAS DE VALIDACIÓN	96
ANEXO 8: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA MADURACIÓN EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN	97
ANEXO 9: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA MADURACIÓN EN PARCELAS DE VALIDACIÓN	97
ANEXO 10: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 30 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN	97
ANEXO 11: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 30 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN.....	98
ANEXO 12: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 60 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN	98
ANEXO 13: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 60 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN.....	98
ANEXO 14: PRUEBA DE KRUSKAL WALLIS DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 90 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN.....	99
ANEXO 15: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 90 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN.....	99
ANEXO 16: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 120 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN	99

ANEXO 17: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 120 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN.....	100
ANEXO 18: PRUEBA DE KRUSKAL WALLIS DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 150 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN.....	100
ANEXO 19: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) MEDIDA A LOS 150 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN.....	100
ANEXO 20: PRUEBA DE VARIANZA DEL RENDIMIENTO (Mg.ha – 1) EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN	101
ANEXO 21: PRUEBA DE VARIANZA DEL RENDIMIENTO (Mg.ha – 1) EN PARCELAS DE VALIDACIÓN	101
ANEXO 22: EVALUACIONES FENOLÓGICAS (días) EN LAS PARCELAS DE CALIBRACIÓN.....	101
ANEXO 23: EVALUACIONES FENOLÓGICAS (días) EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN.....	102
ANEXO 24: EVALUACIONES DE BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) EN LAS PARCELAS DE CALIBRACIÓN	102
ANEXO 25: EVALUACIONES DE BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha – 1) EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN	103
ANEXO 26: RENDIMIENTO EVALUADO (Mg.ha – 1) EN LAS PARCELAS DE CALIBRACIÓN.....	103
ANEXO 27: RENDIMIENTO EVALUADO (Mg.ha – 1) EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN.....	104
ANEXO 28: COBERTURA DEL DOSEL (%) MEDIDA EN LAS PARCELAS DE CALIBRACIÓN.....	105
ANEXO 29: COBERTURA DEL DOSEL (%) MEDIDA EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN.....	106
ANEXO 30: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA VARIEDAD PASANKALLA (a), BLANCA DE JULI (b), SALCEDO INIA (c) DE LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN EN DESARROLLO DE LA INFLORESCENCIA O PANOJA Y UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA EN TARACO (d).....	107

RESUMEN

La región altoandina se caracteriza por encontrarse constantemente expuesta a eventos meteorológicos extremos, lo cual impacta negativamente el rendimiento de los cultivos. El presente estudio buscó evaluar la solidez del modelo AquaCrop como una alternativa para la predicción del comportamiento del cultivo de quinua en diferentes ambientes y con diferentes prácticas de manejo. Se evaluó el desempeño del modelo para tres variedades de quinua (Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli) bajo condiciones de Taraco, Puno en Perú. El modelo fue calibrado con fecha de siembra 7 de noviembre del 2018 y se obtuvo un desempeño de “bueno” para la cobertura del dosel ($NRMSE < 20\%$, $EF > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$) y de “bueno” a “aceptable o justo” para la biomasa seca aérea ($10\% < NRMSE < 30\%$, $EF > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$). Posteriormente, el modelo se validó con los datos obtenidos durante la calibración y fueron probados con fecha de siembra 25 de octubre del 2018, obteniéndose un desempeño de “bueno” para cobertura del dosel ($NRMSE < 20\%$, $EF > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$) y de “aceptable o justo” para la biomasa seca aérea ($NRMSE < 30\%$, $EF > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$). Por lo tanto, se demostró la solidez del modelo AquaCrop para simular el comportamiento del cultivo de quinua bajo condiciones del Altiplano peruano.

Palabras clave: Pasankalla, Salcedo INIA, Blanca de Juli, validación, cobertura del dosel, biomasa

ABSTRACT

The Andean highlands are characterized by their constant exposure to extreme weather events, which negatively impacts crop yields. The present study seeks to evaluate the robustness of the AquaCrop model as an alternative for the prediction of quinoa crop performance in different environments and management practices. The performance of the model was evaluated for three quinoa varieties (Pasankalla, Salcedo INIA and Blanca de Juli) in Taraco, Puno, Peru. The model was calibrated with the planting date of November 7, 2018, where “good” performance was obtained for the canopy cover ($\text{NRMSE} < 20\%$, $\text{EF} > 0.75$, $d > 0.90$ and $R^2 > 0.5$) and a "good" to "acceptable or fair" performance was obtained for the above-ground dry biomass ($10\% < \text{NRMSE} < 30\%$, $\text{EF} > 0.75$, $d > 0.90$ and $R^2 > 0.5$). Subsequently, the model was validated with the data obtained during calibration and tested for the planting date October 25, 2018, obtaining a “good” performance for canopy cover ($\text{NRMSE} < 20\%$, $\text{EF} > 0.75$, $d > 0.90$ and $R^2 > 0.5$) and "acceptable or fair" performance for the above-ground dry biomass ($\text{NRMSE} < 30\%$, $\text{EF} > 0.75$, $d > 0.90$ and $R^2 > 0.5$). Therefore, the AquaCrop model showed robustness when simulating quinoa crop performance under Peruvian highlands conditions.

Key words: Pasankalla, Salcedo INIA, Blanca de Juli, validation, canopy cover, biomass

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de quinua sobresale por su importancia en la seguridad alimentaria de Puno, quinto departamento más grande en el Perú (Oficina de Gestión de la Información y Estadística, 2016), y líder en producción del cultivo con 39610 ton registradas en el 2017 (Ministerio de Agricultura y Riego, 2018).

Uno de los principales factores del bajo rendimiento registrado especialmente en la región altoandina es la ausencia de la aplicación de riego y la constante exposición a eventos meteorológicos extremos como heladas y sequías; tal como lo indica El plan Multisectorial ante Heladas y Friajes (Presidencia del Consejo de Ministros, 2014). En este plan se calculó que Puno se encuentra dentro de las regiones que presenta riesgo alto y muy alto ante heladas.

Asimismo, la mayor predominancia de sequías se observa en la misma región andina sur de nuestro país. Esto genera un impacto sobre la agricultura de la zona, que se realiza principalmente bajo secano (Autoridad Nacional del Agua, 2010; Centro de Estudios y Prevención de Desastres, 2011).

La importancia de contar con recursos científicos en la producción de cultivos frente a eventos meteorológicos extremos ha sido demostrada en numerosos casos de éxito en el mundo. Innovaciones promovidas para reducir la pobreza entre los pequeños agricultores de frijol en África subsahariana ha permitido el acceso al mercado y asesoramiento de servicios de 207 520 hombres y 117 382 mujeres, así como el consumo del grano con alto contenido de hierro. Este último se logró mediante diversas acciones, entre ellas el uso de servicios de información climática, que permitió mejorar la resiliencia de los agricultores frente al impacto del cambio climático (*Pan Africa Bean Research Alliance*, 2021).

El presente estudio adquiere relevancia debido a que, en el Perú, “la cadena de valor de la quinua y otros granos andinos agrupa a muchos pequeños productores en situación de pobreza, por tanto, producir con mayor efectividad y eficiencia tiene un impacto en su calidad de vida, tal como lo afirma el Programa Conjunto Granos Andinos de las Naciones Unidas” (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2017).

En ese sentido, la utilización del modelo AquaCrop como una alternativa para la simulación del comportamiento del cultivo en diferentes condiciones ambientales y de manejo contribuirá a prevenir y mitigar efectos adversos del clima en la producción de los agricultores de Taraco.

El objetivo general de este estudio fue evaluar el desempeño del modelo AquaCrop en la simulación productiva de la quinua bajo condiciones de Taraco, Puno en Perú. Los objetivos específicos fueron:

- Calibrar el modelo AquaCrop para tres variedades de quinua (Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli).
- Validar el modelo AquaCrop para tres variedades de quinua (Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El presente capítulo comprende una recopilación de conceptos teóricos y estudios relacionados con el fin de comprender las generalidades del cultivo de quinua y el modelo AquaCrop.

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se desarrolló en un terreno cercano al lugar donde se realizan observaciones meteorológicas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) en el distritito de Taraco en Puno. El área experimental abarca cerca de 518.4m².

2.1.1. UBICACIÓN Y LÍMITES

El distrito de Taraco se ubica en la provincia de Huancané, departamento de Puno. Geográficamente está comprendida entre los 15° 18' 42" S de latitud y 69°58' 20.9" W de longitud del sistema de coordenadas geográficas DATUM WGS84, con una altitud de 3849 m s.n.m.

Limita por el noreste con el distrito de Huancané; por el sureste con el lago Titicaca; por el sur con el distrito de Pusi; y por el noroeste con el distrito de Saman (ver Figura 1).

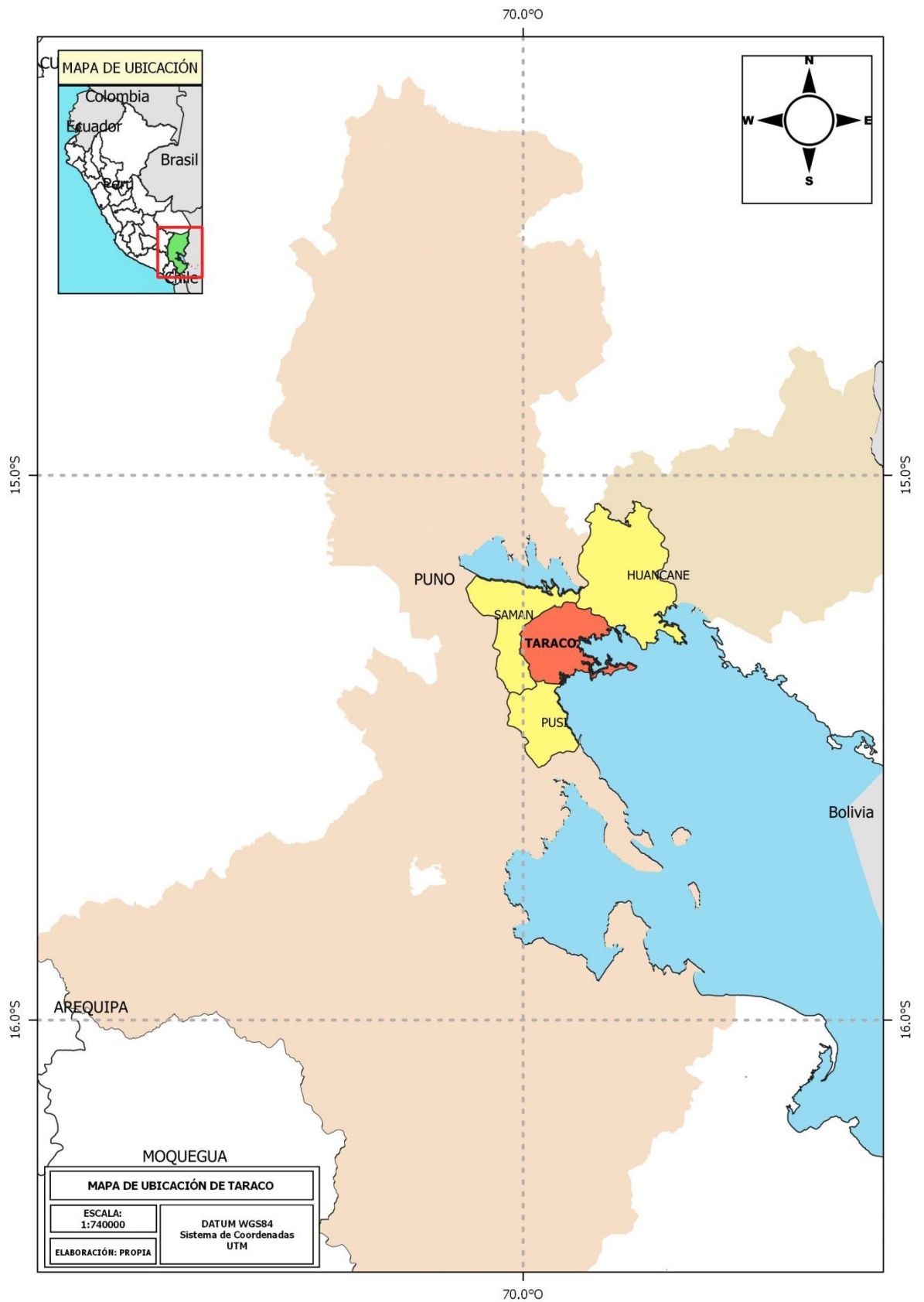


Figura 1: Mapa de ubicación y límites de Taraco

2.2. CULTIVO DE QUINUA

2.2.1. TAXONOMÍA

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willdenow) pertenece a la Sección Chenopodia, género *Chenopodium*, familia Chenopodiaceae (Apaza *et al.*, 2013).

2.2.2. MORFOLOGÍA

La raíz es pivotante con abundante ramificación y múltiples raicillas delgadas, que se extienden rápidamente después que el tallo empieza a ramificarse. Esto facilita la absorción de agua y nutrientes. La raíz sirve de sostén a la planta, permitiendo mantener el peso de la panoja, se vuelven leñosas. (Mujica *et al.*, 1997).

Gómez & Aguilar (2016) indicaron que la morfología de la quinua se describe de la siguiente manera:

- Raíz: Es de tipo pivotante y 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.
- Tallo: En la unión con el cuello de raíz es cilíndrico y se vuelve anguloso en las zonas de nacimiento de hojas y ramas a medida que se aleja del suelo. La altura de la planta varía de 0.5 m a más de 3 m, siendo medida desde la base del tallo hasta el ápice de la inflorescencia. Generalmente las variedades de los ecotipos de valle son más altas que las del Altiplano.
- Hojas: Tienen dos partes diferenciadas, estas son el peciolo y la lámina. El peciolo de la hoja es largo y acanalado; son más largos aquellos que se originan directamente del tallo y más cortos los que se originan en las ramas. La lámina de la hoja tiene tres venas principales que se originan en el peciolo. Son más grandes en el follaje y más pequeñas en la inflorescencia. El color de la lámina predominantemente es verde. A la madurez las láminas se tornan amarillas, naranjas, rosadas, rojas o purpuras.

- **Inflorescencia:** Es una panoja con una longitud que varía entre 15 a 70 cm. Tiene un eje principal, ejes secundarios y eje terciarios. Considerando la forma y posición de los glomérulos (grupos de flores), las inflorescencias se clasifican en amarantiformes, glomerulatas e intermedias.
- **Flores:** Son sésiles y están agrupadas en glomérulos. La quinua es una planta ginemonoica porque presenta dos tipos de flores en la misma planta; hermafroditas y pistiladas. La quinua se considera autógena con un porcentaje de cruzamiento de 17%, aproximadamente.
- **Fruto:** Es un aquenio de forma lenticular, elipsoidal, cónico o esferoidal, cubierto por el perigonio sepaloide o las envolturas florales que rodean el fruto y se desprenden con facilidad a la madurez. El fruto está constituido del pericarpio (capa del fruto) y la semilla.
- **Semilla:** Presenta tres partes bien definidas que son el epispermo, embrión y perisperma. El epispermo es la capa que cubre la semilla y está adherida al pericarpio. El embrión está formado por dos cotiledones y la radícula, y constituye aproximadamente el 30% del volumen total de la semilla y envuelve al perispermo como un anillo. El perispermo es el principal tejido de almacenamiento; reemplaza al endospermo y está constituido mayormente por granos de almidón.

2.2.3. FENOLOGÍA

De acuerdo a lo encontrado por Sosa Zuniga *et al.* (2017) en la estandarización fenológica del cultivo de quinua usando el código BBCH (*Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt und CHmische Industrie*), esta especie presenta 9 fases que comprende desde germinación hasta senescencia. Cada una de estas fases tiene etapas secundarias que se adaptan y cambian de acuerdo al comportamiento de los cultivares, así como el resultado del efecto del ambiente y su carácter genético.

Gómez & Aguilar (2016) indicaron que la fenología de la quinua consta de las siguientes fases:

- **Germinación:** La primera estructura en emerger es la radícula la cual se alarga hacia abajo dentro del suelo y da inicio a la formación del sistema radicular. El hipocótilo sale de la semilla y crece hacia arriba atravesando el suelo; o emerge llevando los cotiledones que se abren y se tornan verdes iniciando el proceso de fotosíntesis. La germinación se considera una fase crítica que es afectada por los estreses de agua y temperatura.
- **Desarrollo vegetativo:** Se inicia con la aparición, entre las dos hojas cotiledonales, de la primera y segunda hoja verdadera. Estas crecen y se expanden en direcciones opuestas, simétricas y perpendiculares a los cotiledones que aún permanecen verdes. Se observan los primordios de la tercera y cuarta hoja en el ápice de crecimiento antes de que las dos primeras hojas se hayan expandido totalmente. Una vez formada la quinta hoja verdadera se observa la formación de yemas en las axilas de las primeras hojas. El crecimiento y desarrollo de hojas sigue este patrón simétrico descrito. En el estado de 10 pares de hojas verdaderas, las yemas auxiliares de las primeras hojas empiezan a formar las ramas y la planta pierde su simetría en la disposición de las hojas. Se puede observar en general en el ápice de crecimiento, la formación del primordio floral.
- **Ramificación:** Se inicia en plantas con cinco pares de hojas verdaderas, por lo que superpone con el desarrollo vegetativo y el desarrollo de botón floral. Las yemas formadas en las axilas de las primeras hojas se activan en forma secuencial; iniciándose con la yema axilar de la primera hoja y así sucesivamente.
- **Desarrollo del botón floral:** Esta fase es muy rápida y se superpone con la fase de desarrollo vegetativo y con la fase de ramificación. Se reconoce fácilmente por la aparición del primordio o botón floral en el ápice de la planta. Se describe considerando el tamaño del primordio floral desde su aparición hasta la formación de una estructura piramidal que señala el inicio de la formación de la inflorescencia.

- Desarrollo de la inflorescencia o panoja: Comprende la formación y crecimiento de la inflorescencia. La estructura piramidal o cónica formada por los primordios de glomérulos empieza a elongarse y se da la formación de hojas típicas de la inflorescencia, tomando la forma de cada tipo de inflorescencia. Se forman las flores y las estructuras reproductivas. Es a partir de esta fase fenológica que se observa el inicio de la defoliación en la base de la planta.
- Floración: Se inicia con la apertura de las flores. Las flores hermafroditas y las pistiladas se abren al mismo tiempo. Estas flores se pueden observar a simple vista, especialmente las flores hermafroditas con anteras amarillas intensas y brillantes. La apertura de las flores, en algunas variedades, se inicia en la flor hermafrodita del ápice del glomérulo y las flores localizadas en diferentes partes del glomérulo, en cualquier parte de la inflorescencia. En otras variedades las flores se abren simultáneamente en diferentes glomérulos a lo largo de toda la panoja. La floración en las panojas de las ramas puede iniciarse durante el periodo de floración de la inflorescencia principal y puede durar más que en la principal. En promedio, las flores permanecen abiertas durante 5 a 7 días y la máxima apertura ocurre entre las 10 a.m. y las 2:00 p.m. En general existe asincronía en la floración, que es un mecanismo importante para tolerar temperaturas extremas durante la floración y asegurar que parte de la inflorescencia pueda tener flores viables. En la misma panoja, la floración puede durar de 12 a 15 días. La duración de la floración es variable y dependerá de la variedad. En esta fase el cultivo es bastante sensible a las temperaturas extremas y a las sequías.
- Antesis: Esta fase se superpone con la floración. Es la fase de liberación de polen por las flores hermafroditas. Se calcula una polinización cruzada de alrededor del 17%. Este estado finaliza con la muerte de las anteras y el cierre del perigonio sepaloides y la eliminación de hojas en la base de la planta.
- Fruto, crecimiento y estado acuoso: Durante esta fase de crecimiento del grano, estos están llenos de una sustancia acuosa por lo que se denomina a esta fase “estado acuoso”. Se puede observar la formación de las partes constitutivas de fruto, principalmente el de los cotiledones.

- Fruto en estado lechoso: Esta fase se superpone con la del estado acuoso. Los granos formados y con un 100% de su tamaño empiezan a recibir fotosintatos de las hojas, y las partes verdes de las inflorescencias y la sustancia acuosa es reemplazada con una sustancia lechosa. El color del fruto se diferencia al del perigonio sepaloide o envolturas florales y al de los ejes de la inflorescencia. En este estado se aprecia que el tercio superior de hojas esta verde, en plena actividad fotosintética y que los 2/3 inferiores están empezando a decolorarse o en proceso de senescencia.
- Fruto en estado masoso: Los frutos al ser presionados presentan una consistencia pastosa de color blanco con apariencia de masa con una humedad aproximada de 45%. En esta fase la planta alcanza la madurez fisiológica. Se inicia un proceso de perdida de humedad de los granos y la planta hasta alcanzar la madurez de cosecha. Los frutos secos con una humedad aproximada de 20% pueden partirse fácilmente con la uña (estado rayable con la uña) y los granos con 12-14% de humedad requieren ser partidos con los dientes (estado frágil bajo el diente).

2.2.4. VARIEDADES DE QUINUA

La quinua es considerada como una especie oligocéntrica, con centro de origen de amplia distribución y diversificación múltiple, considerándose las orillas del Lago Titicaca como la zona de mayor diversidad y variación genética (Mujica, 1992).

En el Perú, al estudiar la diversidad genética de la colección de germoplasma de quinua, se identificaron cinco sub-centros de diversidad (Apaza *et al.*, 2008, 2009 citado por Apaza *et al.*, 2013). Uno de estos sub-centros, ubicado en el Altiplano de Puno, alberga la mayor diversidad genética de tamaños, colores y sabores. Los otros cuatro se ubican en los valles interandinos de las regiones de Junín, Cusco, Ayacucho y Apurímac.

Tabla 1: Variedades comerciales de quinua en el Perú

Nombre de la variedad	Zonas de producción
INIA 431 - Altiplano	Altiplano, Costa
INIA 427 - Amarilla Sacaca	Valles Interandinos
INIA 420 - Negra Collana	Altiplano, Valles Interandinos, Costa
INIA 415 - Pasankalla	Altiplano, Valles Interandinos, Costa
Illpa INIA	Altiplano
Salcedo INIA	Altiplano, Valles Interandinos, Costa
Quillahuaman INIA	Valles Interandinos
Ayacuchana INIA	Valles Interandinos
Amarilla Marangani	Valles Interandinos
Blanca de Juli	Altiplano
Blanca de Junín	Valles Interandinos, Costa
Cheweca	Altiplano
Huacariz	Valles Interandinos
Hualhuas	Valles Interandinos
Huancayo	Valles Interandinos
Kankolla	Altiplano
Mantaro	Valles Interandinos
Rosada de Junín	Valles Interandinos
Rosada de Taraco	Altiplano
Rosada de Yanamango	Valles Interandinos

FUENTE: Apaza *et al.* (2013)

Las variedades que serán utilizadas en el presente estudio son las siguientes:

- **INIA 415 – Pasankalla**

Esta variedad está adaptada a una zona agroecológica suni del Altiplano entre los 3800 y 3900 m s.n.m., con clima frío seco, precipitación pluvial de 400 a 550 mm, temperaturas de 4° a 15°C y suelos de textura franco y franco arenoso con pH de 5.5 a 8. También se adapta a valles interandinos entre los 2750 a 3750 m s.n.m. y en costa entre los 640 y 1314 m s.n.m., con temperatura máxima de 24 a 25°C en suelos de textura franco arenoso.

Tabla 2: Descripción general de la variedad INIA 415-Pasankalla

	Componente	Característica
Descripción general	Ciclo vegetativo	144 días para el Altiplano
		120 días para valles interandinos
		105 días para la costa
Fenología	Altura de planta	1.30 a 1.4 m
	Rendimiento promedio de grano	3.54 Mg.ha ⁻¹
	Días a la emergencia	9 días
	Días hasta el inicio de panoja	85 días
	Días hasta la floración	116 días
	Días hasta la madurez fisiológica	144 días

FUENTE: Apaza *et al.* (2013)

- **Salcedo INIA**

Esta variedad está adaptada al altiplano, en la zona agroecológica circunlacustre y suni del Altiplano entre los 3800 y 3950 m s.n.m., con clima semi seco frío, precipitación pluvial de 400 a 560 mm, temperaturas de 6° a 17°C y en suelos de textura franco y franco arenoso con pH de 5.5 a 7.8. También se adapta a valles interandinos y costa de 640 a 1314 m s.n.m., con una temperatura máxima de 24 a 25°C en suelos de textura arenosa.

Tabla 3: Descripción general de la variedad Salcedo INIA

	Componente	Característica
Descripción general	Ciclo vegetativo	150 días para el Altiplano
		135 días para valles interandinos
		120 días para la costa
Fenología	Altura de planta	1.48 a 1.70 m
	Rendimiento promedio de grano	2.50 Mg.ha ⁻¹ en zona alto andina 6.50 Mg.ha ⁻¹ en costa y valles interandinos
	Días a la emergencia	7 días
	Días hasta el inicio de panoja	57 días
	Días hasta la floración	95 días
	Días hasta la madurez fisiológica	150 días

FUENTE: Apaza *et al.* (2013)

- **Blanca de Juli**

Esta variedad está adaptada a la zona agroecológica circunlacustre y suni del Altiplano entre los 3800 y 3900 m s.n.m., con clima frío seco, precipitación pluvial de 450 a 600 mm, temperaturas de 4° a 15°C y suelos de textura franco o franco arenoso con pH de 5.5 a 8.0.

Tabla 4: Descripción general de la variedad Blanca de Juli

	Componente	Característica
Descripción general	Ciclo vegetativo	160 días (semi precoz)
	Altura de planta	1.20 m
	Rendimiento promedio de grano	1.50 a 2 Mg.ha ⁻¹
	Días a la emergencia	7 días
	Días hasta el inicio de panoja	63 días
Fenología	Días hasta la floración	105 días
	Días hasta la madurez fisiológica	160 días

FUENTE: Apaza *et al.* (2013)

2.2.5. FISIOLÓGÍA DE LAS PLANTAS A CONDICIONES DE ESTRÉS

El estrés es definido por Taiz & Zeiger (2006) como una influencia negativa del factor externo en la planta. Salisbury & Ross (1992) sugirieron como estresante a cualquier cambio en las condiciones ambientales que resulte en una respuesta menor a la óptima en la planta. Para Azcón-Bieto & Talón (2003), se presenta estrés cuando las plantas reaccionan ralentizando o deteniendo sus funciones fisiológicas básicas y reduciendo su vigor. El estrés abiótico altera el metabolismo de la planta, lo cual afecta negativamente en el crecimiento, desarrollo y la productividad. Si el estrés se presenta severo y/o continúa por un período mayor de tiempo, puede conducir a una carga metabólica intolerable en las células, que ocasiona un menor crecimiento y en casos extremos puede resultar en la muerte de la planta (Madhava *et al.*, 2006). Bray *et al.* (2000) citado por Koyro *et al.* (2012) menciona que para un crecimiento óptimo, la planta requiere una cierta cantidad de cada factor ambiental abiótico, y cualquier desviación de tales condiciones, es decir, un exceso o déficit en el entorno químico o físico, se considera como estrés abiótico y afecta negativamente el crecimiento, el desarrollo y/o la productividad de las plantas.

a. Estrés por bajas temperaturas en las plantas

Las bajas temperaturas tienen diferentes efectos en las plantas, siendo una de las principales la muerte celular debido a la deshidratación celular y el trauma mecánico causado por la formación de cristales de hielo (Duca, 2015). Según Taiz & Zeiger (2006), el daño por frío se muestra en diferentes procesos metabólicos de las plantas incluyendo la alteración funcional de la membrana celular durante el enfriamiento, el rompimiento de proteínas, enzimas y la permeabilidad de la membrana (Benavides, 2002). Por otro lado, Madhava *et al.* (2006), señala que el daño celular en respuesta al estrés por el caso de congelación es causado por la desnaturalización de las proteínas. Además, de acuerdo a Benavides (2002) se puede diferenciar el daño por congelamiento rápido o lento: en el primero el hielo se forma en el citoplasma y hay ruptura celular, mientras que en el segundo, el hielo se forma en la pared celular y el citoplasma se deshidrata.

b. Estrés por bajas temperaturas en la quinua

La quinua es conocida debido a su alta tolerancia a condiciones extremas tales como salinidad, sequía, bajas temperaturas y alta radiación solar (Risi y Galwey, 1984; González *et al.*, 2015 citado por González *et al.*, 2017). Además, según Bhargava *et al.* (2006) la resiliencia de la quinua a los estreses abióticos es el resultado de una amplia variabilidad genética.

Dependiendo de las características genotípicas y el estado de crecimiento fenológico, la quinua puede tolerar un rango amplio de temperaturas (de -8°C a 38°C) (Jacobsen *et al.*, 2005; Bazile *et al.*, 2013 citado por González *et al.*, 2017).

Rosa *et al.* (2004) sugirió que las bajas temperaturas, más que la absorción de agua, es la principal responsable de los cambios en los carbohidratos y las actividades enzimáticas que se observan en las plántulas de quinua. Esto podría considerarse como una de las razones por la que este cultivo tiene un alto umbral de resistencia al frío y sequía.

Salcedo *et al.* (2014), reportó que la variabilidad del tiempo relacionada a la aparición de botones florales y a la tasa de aparición de hoja a causa de la sensibilidad a la temperatura

está asociada con características de los ambientes originales, siendo mayor tiempo en ambientes con limitaciones de agua y a bajas temperaturas; además, que la adaptación a su temporada de crecimiento corto se expresa a través de una mayor precocidad, parcialmente compensado por una mayor tasa de aparición de hojas.

Jacobsen *et al.* (2005) estudiaron la respuesta de la quinua a heladas, y encontraron que la tolerancia a esta condición ambiental podría deberse al nivel de azúcar soluble, prolina y contenido proteico. Es decir, la tolerancia a las heladas puede ser en parte atribuido a un mayor nivel de solutos, que protegen y sostienen las estructuras celulares bajo estrés por heladas. Este estudio sugirió usar el nivel de azúcar soluble como indicador de la resistencia a este fenómeno climático.

c. Estrés por sequía en las plantas

La sequía puede ser definida como la deficiencia prolongada de precipitación por lo general durante una temporada o más (Trenberth *et al.*, 2014). La ausencia de precipitaciones en ambientes naturales provoca la sequedad de la atmósfera y el suelo. En el caso del suelo es debido principalmente a la evaporación del agua de su superficie durante el día (Madhava *et al.*, 2006).

De acuerdo con Duca (2015), la sequía está determinada por la falta de agua en el suelo debido a las altas temperaturas y la disminución de la humedad relativa del aire. Además, se señala que, la sequía temporal, aunque actúa por un período corto, puede ser muy destructiva para las plantas, especialmente cuando hay déficit de agua en el suelo. Esto es debido que la transpiración vegetal es mucho más intensa que la absorción de agua por las raíces y tiene como consecuencia un desequilibrio en el régimen hidrológico que provoca que la planta se marchite y se generen síntomas como pérdida de la turgencia de células y tejidos, y coloración amarillenta de las hojas.

Un proceso fisiológico que se ve afectado por la sequía es la permeabilidad de la membrana biológica. Esta permeabilidad disminuye y los procesos del metabolismo se reducen en intensidad. Durante la sequía, las plantas primero pierden el agua libre, luego el agua ligada;

y como efecto, la pérdida de agua conduce a una respiración más intensa y al bloqueo del proceso de fotosíntesis (Duca, 2015).

El déficit de agua celular resulta en la concentración de solutos, pérdida de turgencia, cambio en el volumen celular, alteración de los gradientes potenciales del agua, cambio en la integridad de la membrana, desnaturalización de proteínas y varios componentes fisiológicos y moleculares (Griffith & Parry, 2002; Lawlor 2002; Lawlor & Cornic, 2002; Raymond & Smirnoff, 2002; Parry *et al.*, 2002; Bartels y & Souer, 2003 citado por Duca 2015). También se señala que los efectos del estrés dependen del grado y la duración de este, la etapa de desarrollo de la planta, la capacidad genotípica de las especies y las interacciones ambientales.

d. Estrés por sequía en la quinua

La adaptabilidad de la quinua a varios niveles de sequía se debe a la diferenciación de una diversidad de ecotipos que se originan en contrastantes agroambientes (Salcedo *et al.*, 2014).

La tolerancia a la sequía de la quinua se ha atribuido a la presencia de vesículas foliares que contienen oxalato de calcio, que podría reducir la transpiración (Jensen *et al.*, 2000; Siener *et al.*, 2006) como se citó en Salcedo *et al.* (2014). Además, la planta evita la sequía debido a la reducción de su área foliar por desprendimiento de hojas, a la presencia de células pequeñas y paredes gruesas que conservan turgencia incluso después de severas pérdidas de agua, y a la regulación del estoma (Jensen *et al.*, 2000).

Alvar *et al.* (2019), en un estudio realizado en Burkina Faso, encontró que la quinua tiene una alta eficiencia en el uso del agua bajo condiciones de estrés por sequía y menciona que algunas respuestas fisiológicas frente a estas condiciones son a causa del cierre rápido de estomas, la presencia de estomas hundidos, el crecimiento del brote restringido y la senescencia acelerada de las hojas, que le daba a la planta una adaptabilidad óptima a ambientes secos.

2.2.6. REQUERIMIENTOS DEL CULTIVO

e. Requerimientos climáticos

• Temperatura

Las temperaturas óptimas de crecimiento y desarrollo, dependiendo de las variedades, están en el rango de 15 a 25°C. Tanto las bajas como las altas temperaturas originan esterilidad de polen y afectan el desarrollo y crecimiento de la planta (Gómez & Aguilar, 2016).

Las granizadas del periodo lluvioso de diciembre a marzo en Perú y Bolivia causan daños tanto en el follaje como en las panojas. El tamaño del granizo y la duración de la granizada influyen especialmente en el periodo juvenil de la lámina foliar y en el ángulo de inserción de las láminas (Tapia *et al.*, 1979). En fase de panoja, los daños parecen ser iguales a cualquier edad, es decir, tanto en estado lechoso como pastoso de los granos. Sin embargo, si los granos están secos, se produce el desgrane y esto ocurre generalmente en marzo con el común de las variedades (Tapia *et al.*, 1979).

Canahua & Rea (1979) citado por Bhargava & Srivastava (2013) mencionaron que la quinua en estado vegetativo a partir de cinco hojas no sufre daños por heladas, pero en la formación de botones florales y antesis es susceptible. Asimismo, de acuerdo a Jacobsen *et al.* (2005) citado por Rosa *et al.* (2009) la quinua en la etapa cotiledónea, de dos y cinco hojas, tiene una alta resistencia a las heladas sin daños a baja temperaturas; sin embargo, la exposición a las heladas durante la formación de botones florales y la antesis tiene un efecto negativo grave. Por otro lado, según Tapia *et al.* (1979) las heladas afectan las cimas superiores, mientras que las partes inferiores se recuperan cuando el cultivo se encuentra en panoja; efecto que puede reconocerse en la madurez de panojas amarantiformes por su aspecto espiga múltiple.

• Humedad-Precipitación

La quinua se cultiva dentro de un rango de precipitación de 300 a 1000 mm. Se considera que el rango de precipitación óptima es de 500 a 800 mm. Los periodos críticos en los que la falta de humedad afecta la productividad son: germinación - emergencia, que determina

el establecimiento del cultivo, y el estado de crecimiento y llenado del fruto que determina la productividad (Gómez & Aguilar, 2016).

- **Fotoperiodo**

La respuesta al fotoperiodo y a la temperatura está relacionada con el lugar de origen, es muy compleja y puede afectar el rendimiento. Se recomienda en general, evitar épocas con alta temperatura y días largos porque afectan el proceso de formación de los granos y por consiguiente el rendimiento (Gómez & Aguilar, 2016).

b. Requerimientos edáficos y nutricionales

Según Veas & Cortés (2016), la quinua presenta mejores resultados en suelos neutros y con texturas franco a franco arenoso, semi profundos, con buen drenaje y alto contenido de materia orgánica. Esto coincide con Gómez & Aguilar (2016), que describen que el cultivo se desarrolla en un rango amplio de diferentes tipos de suelos, considerándose óptimos a los de buen drenaje francos y semi profundos con un alto contenido de materia orgánica.

La quinua es una planta de exigencia media en nutrientes, por lo que la demanda nutricional principal está dada por nitrógeno y calcio, moderadamente en fósforo y poco potasio. La fertilización equivalente en promedio corresponde a la fórmula 100-60-40, y dependerá de la riqueza y contenido de nutrientes de los suelos donde se cultivara la quinua (Veas & Cortés, 2016).

Por otro lado, se considera también que debido a que el centro de origen de la quinua posee una fertilidad de suelo generalmente pobre, es poco exigente en fertilización. Un estudio en Colorado, Estados Unidos, encontró que es posible alcanzar rendimientos de hasta $4.5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ cuando se aplican de 170 a 200 kg N/ha. Asimismo, no se observó efecto alguno sobre el rendimiento cuando se aplicaron 34 kg H_3PO_4 /ha (Oelke *et al.*, 1992 citado por Steduto *et al.*, 2012).

2.3. MODELO

Es la representación de un objeto, sistema o idea, distinto al de la entidad misma u original (Bermón Angarita s. f. citado por IICA, 2015). Un modelo se puede definir como “un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de los que existe en la realidad; los modelos son útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en la realidad en sí” (Wadsworth, 1997).

Un modelo de simulación es una abstracción de un sistema que existe en la sociedad o en la naturaleza. En la agricultura, los modelos de simulación intentan capturar los procesos relevantes en los sistemas de producción de cultivos, aunque no se pueden representar todos los procesos. Sin embargo, esta limitación se puede resolver aplicando una técnica denominada “parametrización”, la cual está basada en el uso de algoritmos, que se agregan al programa o software que ejecuta la modelización (IICA, 2015).

2.3.1. ANTECEDENTES CON EL USO DEL MODELO AQUACROP

Geerts *et al.* (2009), realizaron durante 3 años (2004-2007) experimentos de campo para evaluar la respuesta del cultivo al estrés hídrico de la quinua en el Altiplano boliviano (4000 m.s.n.m.) en diferentes condiciones de riego (desde lluvia hasta riego completo). Las mediciones fisiológicas de los cultivos y las comparaciones entre el contenido de agua del suelo simulado y observado, la cobertura del dosel, la producción de biomasa y el rendimiento final de semillas de un número seleccionado de campos se utilizaron para calibrar el modelo AquaCrop. Posteriormente, el modelo se validó para diferentes ubicaciones y variedades utilizando datos de otros campos experimentales y de campos de agricultores. Se obtuvieron resultados satisfactorios para la simulación de la biomasa total y el rendimiento de las semillas (regresión de validación $R^2 = 0.87$ y 0.83 , y la eficiencia Nash-Sutcliff (EF) = 0.82 y 0.79 , respectivamente) Asimismo, el análisis de sensibilidad demostró la solidez del modelo AquaCrop para la simulación del crecimiento y la producción de quinua.

Flores-Gallardo *et al.* (2013) calibraron y validaron el modelo AquaCrop para simular el desarrollo del cultivo de maíz en el norte de Sinaloa, México, con tres condiciones de

disponibilidad hídrica: riego total y riego deficitario (80 % y 60 % respecto al riego total). Para calibrar y validar el modelo se compararon datos observados y simulados de cobertura del dosel vegetal, producción de biomasa en la cosecha y rendimiento de grano, con datos experimentales de parcelas comerciales de maíz establecidas en los ciclos agrícolas otoño-invierno de 2003-2004, 2007-2008 y 2008-2009, y los ciclos primavera-verano de 2008 y 2009. Las predicciones del rendimiento de grano del modelo fueron buenas con un valor de 0.79 para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y un índice de Willmott (d) de 0.85.

Tornés *et al.* (2016), evaluaron el modelo AquaCrop en la simulación de la cobertura foliar, la biomasa seca aérea y el balance de humedad del suelo en el cultivo del cultivo del frijol, y demostraron que la evolución de las variables simuladas por AquaCrop fueron similares tanto en tendencias como en valores absolutos a los observados. Tomando como criterio los indicadores estadísticos: R^2 con valores de 0.81, 0.95, 0.99; RMSE con valores de 3.4%, 0.45%, 7.3%; NRMSE con valores de 19.3%, 17%, 7%; EF con valores de 0.80, 0.94, 0.63; d con valores de 0.95, 0.98, 0.92, para las variables cobertura del dosel, biomasa seca y contenido de humedad del suelo respectivamente, se pudo comprobar que el modelo es capaz de reproducir las variables observadas de forma confiable.

Mhizha *et al.* (2014) ajustaron y validaron un modelo de productividad del agua, impulsada por el modelo AquaCrop, para el maíz en las condiciones locales en Zimbabwe, para luego desarrollar opciones de manejo de siembra para el apoyo a las decisiones. Los datos de experimentos de 2 temporadas en Harare y de otros 5 sitios alrededor de Zimbabwe se utilizaron para la calibración y validación local de AquaCrop. Parámetros del modelo como el índice de cosecha de referencia, el coeficiente de crecimiento del dosel, disminución temprana del dosel y productividad de agua de biomasa se ajustaron durante la calibración del modelo. El rendimiento del modelo fue satisfactorio después de la calibración con $EF = 0.81$, $RMSE = 15\%$ y $R^2 = 0.86$ tras la validación. Para desarrollar pautas de siembra, se utilizaron series climáticas históricas de 13 estaciones meteorológicas alrededor de Zimbabwe para simular el rendimiento del maíz durante 6 fechas de siembra consecutivas determinadas de acuerdo con los criterios aplicables en Zimbabwe.

De acuerdo con Hadebe *et al.* (2017), en un estudio de simulación de rendimiento de 3 genotipos de sorgo (PAN8816, un híbrido; Macia, una variedad de polinización abierta; y Ujiba, una raza local) cultivados durante las temporadas de siembra 2013/14 y 2014/15 (fechas de siembra temprana, óptima y tardía) se pudo simular cobertura de dosel ($R^2 \geq 0.710$; $RMSE \leq 22.73\%$; $d \geq 0.998$), acumulación de biomasa ($R^2 \geq 0.90$, $RMSE \leq 10.45\%$, $d \geq 0.85$), índice de cosecha ($R^2 \geq 0.90$, $RMSE \leq 7.17\%$, $d \geq 0.987$) y rendimiento ($R^2 \geq 0.945$, $RMSE \leq 3.53\%$, $d \geq 0.783$) para todos los genotipos y fechas de siembra después de la calibración con el modelo AquaCrop.

Ran *et al.* (2018) encontraron que en parcelas con tratamientos de riego en cuatro variedades del cultivo de maíz en la región árida del noroeste de China entre los años 2012 y 2015, el modelo AquaCrop predijo generalmente bien la cobertura del dosel para la mayoría de los tratamientos de riego, con R^2 y error cuadrático medio normalizado (NRMSE) de 0.818 y 19.3%, respectivamente. El modelo fue bastante sensible al estrés hídrico durante la etapa vegetativa e insensible a estrés hídrico durante la etapa de senescencia, lo que resulta en una subestimación y sobreestimación de cobertura del dosel durante estas etapas. En cuanto al proceso de acumulación de biomasa, R^2 y NRMSE fueron 0.929 y 19.1% para todos los tratamientos, respectivamente. Además, el modelo parametrizado estimó la biomasa con precisión en las etapas temprana y media del crecimiento, pero generalmente sobrestimó la biomasa en la etapa madura, dando una precisión ligeramente menor de la biomasa final simulación.

Trabajos realizados por Kanda *et al.* (2021) en el cultivo de capulí consistieron en la calibración y validación del modelo AquaCrop bajo condiciones de secano, riego por goteo subterráneo y riego Moistube con diferentes regímenes hídricos en KwaZulu-Natal en Sudáfrica. Los resultados de la calibración indicaron “muy bien” para la cobertura de dosel simulada ($R^2 = 0.98$, $NRMSE = 12.2\%$, $d = 0.99$ y $EF = 0.95$) bajo 100 % ETc (Evapotranspiración del cultivo) y bajo 70 % ETc ($R^2 = 0.96$, $NRMSE = 15.7\%$, $d = 0.98$ y $EF = 0.90$). La cobertura del dosel simulada coincidió estrechamente con el observado bajo 40% ETc ($R^2 = 0.96$, $NRMSE = 19.6\%$, $d = 0.96$ y $EF = 0.86$). Durante la validación, las simulaciones de la cobertura del dosel fueron buenas para todos los regímenes de agua ($R^2 \geq 0.94$, $NRMSE \leq 15.4\%$, $EF \geq 0.90$ y $d = 0.98$), excepto por debajo del 40% de ETc, donde el desempeño del modelo fue bajo ($R^2 = 0.85$, $NRMSE = 37.5\%$, $d = 0.87$ y $FE = 0.45$).

Las simulaciones para biomasa final fueron buenas con $R^2 = 0.80$ y $NRMSE = 15.7\%$, y $R^2 = 0.99$ y $NRMSE = 9.8\%$ durante la calibración y validación, respectivamente. Los resultados encontrados confirmaron la idoneidad de AquaCrop para 35 simulaciones de respuestas del cultivo al agua.

Según Adeboye *et al.* (2021), en experimentos realizados en soya durante los años 2015 (calibración) y 2016 (calibración y validación) bajo condiciones de secano y diferentes niveles de fertilización nitrogenada en Nigeria, el modelo AquaCrop simuló una cobertura de dosel con R^2 y $FE > 0.90$, $d \geq 0.99$. El modelo capturó la tendencia del pozo de almacenamiento de agua del suelo con R^2 y $EF \geq 0.70$. Asimismo, el modelo predijo la evapotranspiración con R^2 y $EF \geq 0.89$, índice $d = 1.00$. La biomasa aérea se sobreestimó a pesar de que $R^2 \geq 0.98$. Aunque el estrés por nitrógeno redujo el rendimiento de semillas y la productividad del agua, no hubo subestimación o sobreestimación de los rendimientos de semilla, los cuales fueron predichos con bajo error en los diferentes niveles de fertilizante nitrogenado, $R^2 = 0.99$, EF y $d \geq 0.99$. Por lo que reportaron, que el modelo AquaCrop es adecuado para simular la cobertura del dosel, el almacenamiento de agua en el suelo, la evapotranspiración y el rendimiento de semillas de soja de secano con diferentes niveles de fertilizante nitrogenado.

2.3.2. MODELO AQUACROP

Steduto *et al.* (2012), describieron el fundamento científico y los datos de entrada de AquaCrop de la siguiente manera:

AquaCrop es un modelo dinámico que simula el rendimiento alcanzable de los cultivos herbáceos como una función del consumo de agua, bajo diversas condiciones ambientales y de manejo, incluidos escenarios derivados del cambio climático.

La ecuación fundamental para el motor de crecimiento de AquaCrop es la siguiente:

$$(1) \quad B = WP \cdot \sum Tr$$

Donde B es la biomasa seca aérea acumulada producida (kg por m^2), Tr es la transpiración del cultivo (ya sea mm o m^3 por unidad de superficie), la cual es sumada en el tiempo en el

que se produce la biomasa; y WP es el parámetro de productividad del agua (kg de biomasa por m² y por mm, o kg de biomasa por m³ de agua transpirada).

En la mayoría de los cultivos, solo una parte de la biomasa producida se destina a los órganos cosechables para producir rendimiento (Y), y la relación entre el rendimiento y la biomasa se conoce como índice de cosecha (HI), por tanto:

$$(2) \quad Y = HI \cdot B$$

La separación de Y en B y HI permite considerar los efectos de las condiciones ambientales y el estrés en B y HI por separado.

En la Figura 2, se representa esquemáticamente el modelo AquaCrop y se considera el sistema suelo-planta-atmósfera como un continuo, para simular la respuesta de cultivos en términos de rendimiento.

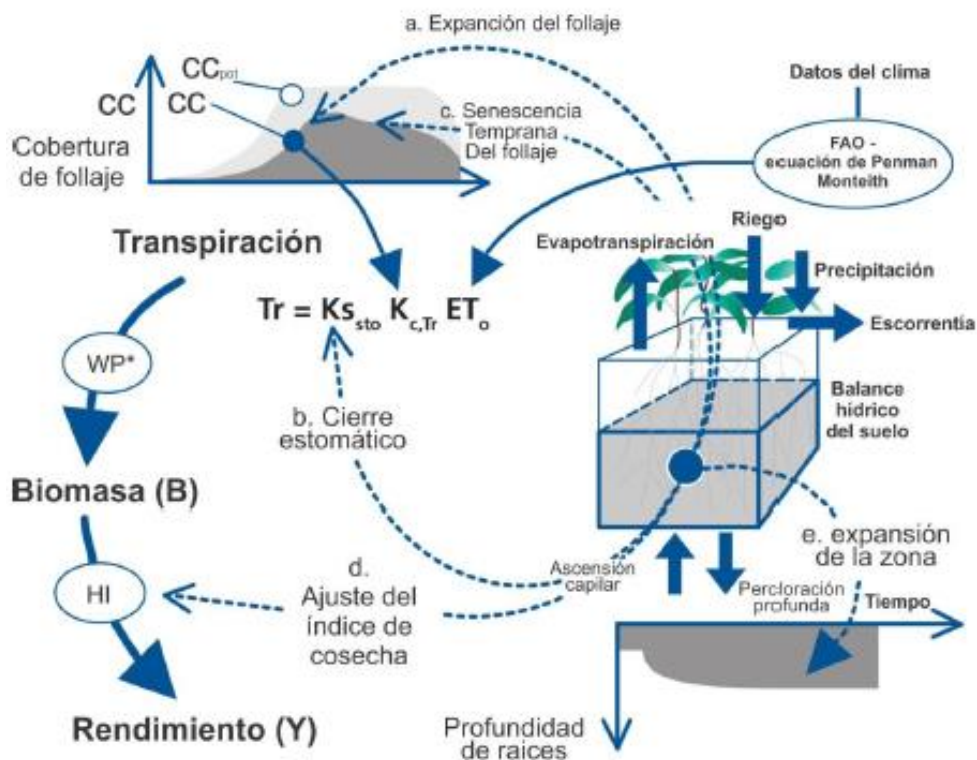


Figura 2: Representación esquemática del modelo AquaCrop

FUENTE: Steduto *et al.* (2012)

a. Parámetros y variables de entrada para la modelación

AquaCrop usa un número relativamente pequeño de parámetros y variables de entrada bastante intuitivas, ya sea por uso común o por calcularse mediante métodos sencillos. Los datos de entrada son: datos del clima, características del suelo y del cultivo, y prácticas de manejo del cultivo. En la Figura 3, se puede observar un resumen esquemático.



Figura 3: Datos de entrada que definen el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo

FUENTE: Steduto *et al.* (2012)

• Datos del clima

Para cada día del periodo de simulación, el modelo requiere una temperatura mínima (T_n) y máxima (T_x) del aire, precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_0) como medida de la demanda evaporativa de la atmósfera. Adicionalmente, la concentración atmosférica media anual de CO_2 debe ser conocida.

La ET_0 se calcula usando la ecuación de Penman-Monteith (Steduto *et al.*, 2012), a partir del set completo de datos diarios del clima y un programa de cálculo de ET_0 , el cual es un software libre de dominio público disponible en la web de la FAO.

Con relación a la concentración media anual de CO_2 requerida para la simulación, AquaCrop proporciona la data aplicable para la mayoría de las ubicaciones. Estos valores anuales son medidos en el Observatorio de Mauna Loa en Hawái y comprenden el periodo desde 1902 hasta los datos disponibles más recientes.

- **Parámetros de cultivo**

Los parámetros se clasifican en dos categorías: conservativos y varietales.

Los parámetros conservativos de cultivo no cambian con el tiempo, las prácticas de manejo, el clima, ni la ubicación geográfica.

Los parámetros de cultivos varietales y dependientes de las condiciones, se saben que varían normalmente dependiendo de las variedades y de las situaciones. Como ejemplos están la duración del ciclo biológico y la fenología de las variedades.

- **Datos de suelo**

Los parámetros necesarios son: contenido volumétrico de agua a capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (PWP), y saturación y la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}); para cada capa de suelo diferenciada que abarca la zona radicular. A partir de estas características, AquaCrop deriva otros parámetros que controlan la evaporación del suelo, el drenaje interno, la percolación profunda, la escorrentía superficial y el ascenso capilar (Steduto *et al.*, 2012). En caso de que falten algunos valores de los primeros cuatro parámetros, el usuario puede emplear los valores indicativos proporcionados por AquaCrop para diversas clases texturales de suelo.

- **Datos de manejo**

Las prácticas de manejo se dividen en: manejo de riego y manejo de campo. En manejo de riego el usuario elige si el cultivo es de secano o de riego. Si es de riego, se puede especificar el método de aplicación, la fracción de superficie húmeda; y para cada evento de riego, la calidad del agua de riego, el momento y la cantidad de riego aplicado. En las prácticas de manejo de campo se encuentran las opciones de niveles de fertilidad del suelo, nivel de infestación de malas hierbas, y prácticas que afectan el balance de agua del suelo. En estas últimas se consideran el acolchado del suelo para reducir su evaporación, los caballones para almacenar agua en el campo, y la eliminación de la escorrentía mediante prácticas de conservación.

b. Fundamentos de los componentes

- **Clima**

La temperatura incide en el desarrollo de los cultivos (fenología). Los efectos adicionales de temperaturas más extremas son la reducción de WP (por tanto, la acumulación de biomasa) cuando el clima es demasiado frío, y reducción de la polinización (por ende, del HI) cuando el clima es demasiado frío o cálido. La precipitación, el riego y la ET_0 son aspectos determinantes del balance de agua de la zona radicular del suelo y del estrés hídrico. La concentración atmosférica de CO_2 incide en la WP, la expansión del dosel y la conductancia estomática.

- **Cultivo**

Este componente incluye los siguientes subcomponentes: fenología, cobertura del dosel, profundidad de raíces, transpiración del cultivo, evaporación del suelo, producción de biomasa y rendimiento cosechable.

- **Fenología**

AquaCrop utiliza los grados día acumulados (GDD) como el reloj interno predeterminado para tener en cuenta los efectos de los regímenes de temperatura en la fenología. No obstante, la simulación se ejecuta y se demuestra en intervalos diarios (diarias del año). Los GDD se calculan según los procedimientos descritos (McMaster & Wilhelm, 1997 citado por Steduto

et al., 2012), con la excepción de que la temperatura mínima (T_n) no se modifica, de modo que esta es equivalente a la temperatura base cuando desciende por debajo de la temperatura base en el cálculo.

- **Desarrollo del dosel**

La cobertura del dosel (CC), más exactamente la cobertura del dosel verde, es una característica crucial de AquaCrop, y es una variable que será utilizada para calibrar el modelo. Su expansión, envejecimiento y senescencia, junto con su conductancia es contralada por las estomas que determinan la cantidad de agua transpirada y a su vez la cantidad de biomasa producida. Para la primera mitad del incremento de CC, se utiliza una ecuación exponencial para la simulación, análoga a la ecuación del porcentaje de crecimiento relativo.

$$(3) \quad CC = CC_0 \cdot e^{CGC \cdot t}$$

Donde CC es la fracción de suelo cubierta por el dosel cuando el tiempo es t, CC_0 es la CC inicial (cuando $t=0$), también en fracción, y CGC es el coeficiente de crecimiento del dosel en fracción o porcentaje de la CC existente cuando el tiempo es igual a t. CC_0 es un agregado de doseles de diversas plantas y se calcula multiplicando la densidad de la plantación por la media del tamaño del dosel por planta (cc_0).

El concepto subyacente a la ecuación (3) (Bradford & Hsiao, 1982 citado por Steduto *et al.*, 2012) se basa en el argumento de que, cuando la cobertura verde del dosel es escasa, el crecimiento del dosel (el cual depende del tamaño actual del dosel para capturar la radiación y realizar fotosíntesis) debe ser proporcional al tamaño del dosel en ese día. Ello da lugar al uso de una ecuación exponencial de crecimiento con un coeficiente constante para simular el desarrollo del dosel hasta la mitad de la CC máxima. Cuando el dosel sigue creciendo y abarca más de la mitad del suelo, la captación de radiación solar y la fotosíntesis empiezan a aumentar menos en proporción con el incremento de la CC, a causa de la sombra que las plantas se proporcionan mutuamente. Por tanto, la ecuación (3) pierde su validez y, para la segunda mitad del desarrollo del dosel, la CC adopta una ecuación exponencial de descomposición:

$$(4) \quad CC = CC_x - 0.25 \left(\frac{CC_x^2}{CC_0} \right) \cdot e^{-CGC \cdot t}$$

Donde CC_x , es la cobertura máxima del dosel bajo condiciones óptimas. AquaCrop permite realizar simulaciones con la ecuación (3) hasta el punto en que $CC=0.5 CC_x$, luego cambia al simular con la ecuación (4) hasta que se alcanza la CC_x . Con base en varios estudios, se proporcionan los valores predeterminados de CC_x para los cultivos calibrados. Dado que la CC_x también se determina mediante la densidad de la plantación (el cual es una opción de manejo agrícola) el usuario deberá ajustar la CC_x predeterminada según la situación real del campo.

A medida que el cultivo se aproxima a la maduración, la CC ingresa en una fase decreciente a causa de la senescencia foliar. La disminución de la cobertura del dosel verde en AquaCrop está caracterizada por un coeficiente empírico de disminución del dosel (CDC), con unidad de reducción fraccionaria de la CC por unidad de tiempo. Este coeficiente es ajustable de modo que se amplíe o reduzca el intervalo de tiempo requerido que abarque desde el inicio de la senescencia hasta el momento en que desaparezca por completo la cobertura de dosel ($CC = 0$).

- **Profundización de las raíces**

La absorción de agua por las raíces en AquaCrop se simula definiendo la profundidad efectiva de las raíces (Z_e) y el patrón de extracción de agua. La Z_e en el momento de la siembra hasta el punto previo a la emergencia corresponde a la profundidad del suelo en la cual la semilla en germinación o plántula naciente puede extraer agua. Para efectos del cálculo del balance de agua en AquaCrop, generalmente se considera adecuada una profundidad efectiva mínima de raíces de 0.2 a 0.3 m al inicio (Z_n). Bajo óptimas condiciones, sin restricciones en el suelo, se prevé alcanzar la profundidad efectiva máxima de raíces (Z_x) casi al final del ciclo biológico del cultivo.

- **Transpiración del cultivo**

La transpiración por unidad de superficie del suelo depende de la fracción de la superficie del suelo cubierta por el dosel (CC) cuando no hay estrés suficiente para limitar la apertura estomática. La Tr se calcula a partir de la ET_0 con el coeficiente de transpiración del cultivo,

simbolizando como $K_{C,Trx}$. Este coeficiente está definido como el coeficiente de cultivo (K:) para transpiración cuando el dosel cubre por completo el terreno (CC está cerca y se aproxima a 1.0) y no se presenta ningún tipo de estrés.

- **Evaporación del suelo**

Se produce principalmente, desde la superficie humedecida del suelo que no está protegida por la sombra del dosel. AquaCrop calcula de manera separada la evaporación del suelo (E) y la Tr.

- **Suelo**

En AquaCrop, el suelo se puede subdividir en dirección vertical hasta en cinco capas de profundidad variable, en donde cada capa (u horizonte) se ajusta a diferentes características físicas del suelo: el contenido de humedad del suelo en el punto de saturación, el límite superior de contenido de agua por gravedad (comúnmente denominado capacidad de campo FC), el límite inferior de contenido de agua donde un cultivo puede alcanzar el punto de marchitez permanente (PWP), y la conductividad hidráulica en el punto de saturación (K_{sat}).

- **Manejo**

AquaCrop comprende dos categorías de prácticas de manejo: el manejo de riego y el manejo de campo.

En el manejo de riego se proporcionan opciones para evaluar y analizar la producción del cultivo y el manejo y uso del agua bajo dos condiciones (secano o de riego). En el manejo de campo se consideran la fertilidad del suelo para el crecimiento del cultivo (sea natural o por fertilización), el acolchado del suelo para reducir la evaporación y el uso de caballones para estacar o controlar la escorrentía superficial y mejorar la infiltración.

2.3.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Según *Joint Committee for Guides in Metrology* (2012), la calibración “es la operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las

correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación, y la validación es la verificación de que los requisitos especificados son adecuados para un uso previsto”.

Validar un modelo es comprobar que con el tipo de datos disponibles se pueden obtener los resultados deseados y que estos serán fiables. Lo cual se logra comparando las predicciones del modelo con mediciones realizadas en el sistema real en funcionamiento, con datos históricos de ese sistema o de sistemas similares. El método clásico de validación es el que se denomina “predicción del pasado” o, “simulación ex post” y consiste en suministrar al modelo datos históricos, cuyos resultados también se conocen (IICA, 2015).

III. METODOLOGÍA

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El estudio se realizó en un terreno próximo a la estación meteorológica CO-Taraco del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) ubicado entre los $15^{\circ} 18' 42''$ S de latitud y $69^{\circ} 58' 20.9''$ W de longitud del sistema de coordenadas geográficas DATUM WGS84, con una altitud de 3849 m s.n.m., Taraco es un distrito que pertenece a la provincia de Huancané en Puno.

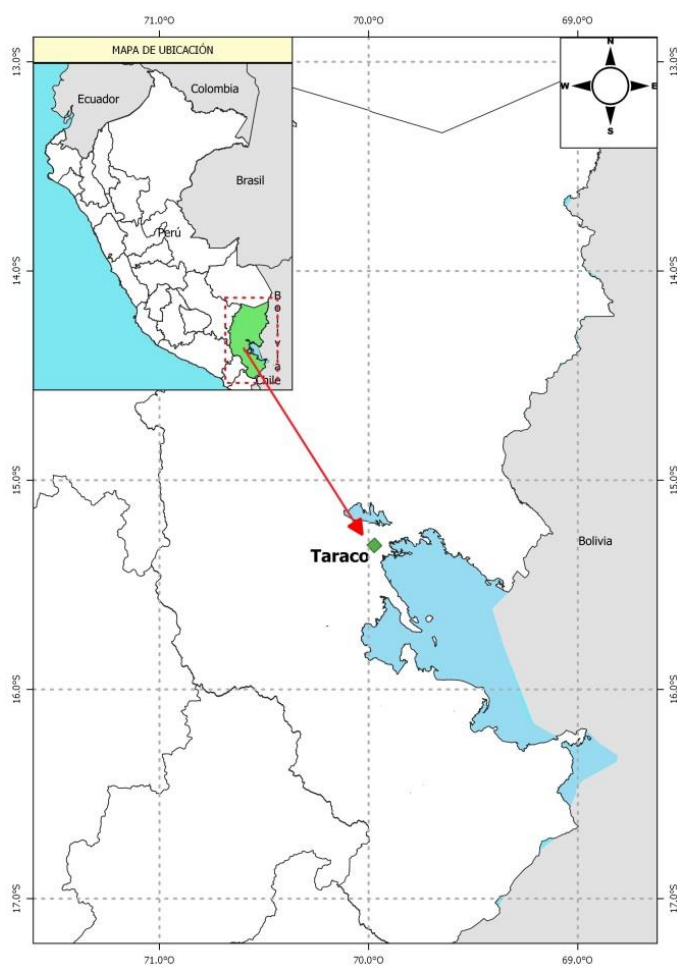


Figura 4: Ubicación del área experimental

3.1.1. ANÁLISIS DE SUELOS

Se realizó un análisis de caracterización de suelo en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (LASPAF) de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Los resultados se presentan en la Tabla 5. El análisis de caracterización del suelo muestra una textura Franco Arcillo Arenosa (muestra 1), Arenoso Franco (muestra 2) y Arena en las muestras 3 y 4. Está clasificado como muy ligeramente salino (0.07 a 0.14 dS/m) con un porcentaje de materia orgánica bajo (0.12 a 1.41 por ciento).

Tabla 5: Análisis de caracterización del suelo del área experimental Taraco, Puno-2018

Muestra	Prof. de capa (cm)	pH (1:1)	C.E (1:1) dS/m	CaCO ₂	M.O %	P (ppm)	K (ppm)	ANÁLISIS MECÁNICO			Clase Textural
								Arena %	Limo %	Arcilla %	
M 1	13	7.01	0.14	0.00	1.41	18.20	189.00	53.00	27.00	20.00	Franco Arcillo Arenoso
M 2	30	7.13	0.13	0.00	0.53	18.30	148.00	77.00	5.00	18.00	Franco Arenoso
M 3	30	7.90	0.08	0.00	0.34	4.70	133.00	91.00	1.00	8.00	Arena
M 4	47	7.73	0.07	0.00	0.12	6.60	166.00	95.00	3.00	2.00	Arena

Muestra	CIC	Cationes Cambiables					Suma de cationes	Suma de Bases	% Sat de Bases	C.C %	P.M %	Nitrógeno Amoniacal ppm	Nitrógeno Nítrico ppm	D.A g/cc
		Cationes Cambiables	Mg	K	Na	Al + H								
			Meq/100g											
M 1	10.72	7.45	2.58	0.41	0.28	0.00	10.72	10.72	100.00	18.78	10.16	8.40	0.74	1.26
M 2	13.76	10.19	2.98	0.29	0.30	0.00	13.76	13.76	100.00	15.77	7.96	16.80	0.00	1.42
M 3	6.44	4.83	1.12	0.27	0.23	0.00	6.44	6.44	100.00	9.86	3.83	16.80	0.00	1.79
M 4	6.40	4.79	1.12	0.27	0.22	0.00	6.40	6.40	100.00	8.42	2.81	14.00	0.00	1.62

FUENTE: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (LASPAF) - UNALM

3.1.2. INFORMACIÓN CLIMÁTICA

Los datos meteorológicos ingresados al modelo AquaCrop fueron valores diarios de temperatura máxima y mínima del aire, evapotranspiración de referencia y lluvia provistos de la estación meteorológica automática del Senamhi (con ubicación descrita en el 3.1), durante el periodo del 1 de octubre del 2018 al 31 de mayo del 2019. La evapotranspiración de referencia fue calculada con el software *Eto Calculator* (v3.1, FAO, 2009).

3.2. CAMPO DE QUINUA

3.2.1. MATERIAL GENÉTICO

Se utilizaron tres variedades comerciales (tablas 2, 3 y 4). Según el catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú (Apaza *et al.*, 2013), la variedad Pasankalla fue liberada en Puno en el año 2006 y el proceso de selección fue a partir de la colecta ingresada al banco de germoplasma con el código PIQ031069 procedente de la localidad de Caritamaya, distrito de Ácora, provincia de Puno en 1978. Por otro lado, la variedad Salcedo INIA fue liberada en Puno en el año 1995 y el proceso de selección del material segregante se realizó por el método masal genealógico de la EEA Illpa Puno, en 1983. Por último, la variedad Blanca de Juli fue liberada en Puno en el año 1974 y el proceso de selección fue masal, a partir de material genético colectado en 1969, alrededor del lago Titicaca, del distrito de Juli, provincia de Chucuito en Puno.

3.2.2. MATERIALES DE CAMPO

Los materiales de campo utilizados fueron: rastrillo, lampa, pico, tijeras de poda, libreta de campo, lápiz, cinta métrica, bolsa de papel, cámara digital y plumón.

3.2.3. EQUIPOS DE LABORATORIO

Los equipos de laboratorio utilizados fueron: balanza y horno. También se utilizó bandejas, bolsas de papel, plumón y computadora.

3.2.4. MANEJO DEL CULTIVO

El cronograma de actividades se detalla en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6: Cronograma de labores realizadas en las parcelas de calibración

FECHA	LABOR	OBSERVACIÓN
7/11/2018	Siembra	Manual
10/12/2018	Desahije	Ninguno
10/12/2018	Riego	147.4 mm
14/12/2018	Riego	147.4 mm
20/12/2018	Riego	147.4 mm
03/01/2019	Aplicación de fungicida (Ridomil)	40 gr/20 lt (2 mochilas)
05/01/2019	Aplicación de abono foliar	80 ml/20 lt (2 mochilas)
15/01/2019	Aporque	Ninguno
15/01/2019	Abonamiento	576 gr de guano de isla y 125,3 gr de urea por parcela
18/01/2019	Riego	147.4 mm
28/01/2019	Aplicación de abono foliar	Ninguno
28/01/2019	Aplicación de fungicida (Ridomil)	40 gr/20 lt (2 mochilas)
15/02/2019	Deshierbo	Ninguno
27/02/2019	Deshierbo	Ninguno
12/03/2019	Deshierbo	Ninguno

Tabla 7: Cronograma de labores realizadas en las parcelas de validación

FECHA	LABOR	OBSERVACIÓN
25/10/2018	Siembra	Manual
20/11/2018	Riego	147.4 mm
30/11/2018	Desahíje	Desahíje con un distanciamiento entre plantas de 15 cm
04/12/2018	Riego	147.4 mm
10/12/2018	Deshierbo	Ninguno
30/12/2018	Deshierbo	Ninguno
03/01/2019	Abonamiento	576 gr de guano de isla y 125.3 gr de urea por parcela
03/01/2019	Aporque	Ninguno
12/01/2019	Aplicación de abono foliar	80 ml/20 lt (2 mochilas)
12/01/2019	Aplicación de Karate	16ml/20lt (2mochilas)
15/01/2019	Deshierbo	Ninguno
16/01/2019	Deshierbo	Ninguno
22/01/2019	Deshierbo	Ninguno
26/01/2019	Aplicación de abono foliar y fungicida	80 ml/20 lt (2 mochilas)

- La preparación del terreno se realizó convencionalmente a las prácticas que se realizan en el Altiplano.
- La siembra fue manual con distanciamiento entre surcos de 0.6m y entre plantas de 0.1m. Esta labor se realizó el 7 de noviembre en las parcelas de calibración y el 25 de octubre en las parcelas de validación.

- El desahije se realizó de forma simultánea con el control de malezas, y con la intención de obtener un distanciamiento de 0.10m entre planta.
- El control de malezas fue manual. A los 69 - 70 días, se realizaron las labores de aporque que permitieron dar mejor fijación a la planta.
- Se aplicó riego complementario, de acuerdo a lo que comúnmente es usado por el agricultor local.
- Se realizó el control químico de hongos. Además, se aplicó abono foliar y el abonamiento del suelo fue con guano de isla y urea.
- Las labores de cosecha se realizaron manualmente, para lo cual se segaron las plantas al ras del suelo y luego se procedió a la evaluación.

3.2.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Cada experimento (calibración y validación) está planteado en un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con 3 repeticiones y 3 tratamientos (variedades), resultando un total de 9 unidades experimentales para calibración y 9 unidades experimentales para validación.

Modelo Aditivo Lineal

$$Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

$i = 1, 2, \dots, t$ $j = 1, 2, \dots, n$

Y_{ij} = Valor observado en la i -ésima variedad y la j -ésima repetición.

μ = media general.

T_i = Efecto de la i -ésima variedad.

B_j = Efecto de la j -ésima repetición.

ε_{ij} = Efecto del error experimental en la i -ésimo variedad y la j -ésima repetición.

Para determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos para cada variable, se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) cuando los datos cumplían el criterio de normalidad, de lo contrario se empleó la prueba de Kruskal Wallis. Posteriormente, se realizó la prueba discriminatoria de Duncan al 5% de nivel de significancia.

3.2.6. RECOLECCIÓN DE DATOS PARA VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN

Para calibrar y validar se utilizaron las siguientes variables: días a la emergencia, días a la formación de grano pastoso, días a la maduración, rendimiento de grano por hectárea ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), biomasa seca aérea ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y porcentaje de cobertura vegetal (%). Estas variables se definieron de la siguiente manera:

- Días a la emergencia (D_{em}): el número de días transcurridos desde la fecha de siembra hasta que el 50% por ciento de las plantas de los surcos centrales emergieron.
- Días a la floración (D_{fl}): el número de días transcurridos desde la fecha de siembra hasta que el 50% por ciento de las inflorescencias de los surcos centrales se abrieron.
- Días a la formación de grano pastoso (D_{ff}): el número de días transcurridos desde la fecha de siembra hasta que el 50% por ciento de las plantas de los surcos centrales obtuvieron a consistencia de grano pastoso rayable con la uña.
- Días a la maduración de cosecha (D_{mad}): el número de días transcurridos desde la fecha de siembra hasta que el 50% por ciento de las plantas de los surcos centrales obtuvieron la consistencia de grano duro (difícil de romper).
- Biomasa seca aérea (B , $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$): Para el cálculo de la biomasa seca por encima del nivel del suelo, se realizaron cinco muestreos en cada parcela experimental, a los 30 días después de la siembra (DDS), a los 60 DDS, a los 90 DDS, a los 120 DDS y a los 150 DDS. Se extrajo la muestra por cada parcela y luego fue pesada para la obtención de la materia húmeda, después fue secada en un horno a 105°C por 48 horas, para la obtención de la materia seca. Para la calibración del modelo AquaCrop se necesita el desarrollo de la biomasa seca aérea a lo largo del periodo vegetativo.
- Rendimiento del cultivo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$): Se realizó la cosecha manual de los surcos centrales de cada parcela. Se calculó el área evaluada por parcela y luego se estimó a $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

- Cobertura vegetal del dosel (%): Se estimó a partir de imágenes fotográficas capturadas durante todas las fases fenológicas según el protocolo establecido por el CIP (*Production Systems and the Environment & International Potato Center, 2013*). En las parcelas de calibración y validación se realizaron 17 y 19 evaluaciones respectivamente. El muestreo por parcela experimental se realizó con un marco de 1m de longitud por 0.6m de ancho. Luego las imágenes fotográficas se procesaron con el software *Image Canopy* (v3.6, CIP, 2017).



Figura 5: Estimación de la cobertura vegetal con el uso del *Canopy Cover*
Imagen real (a) e imagen procesada (b)



Figura 6: Evaluación tomadas en campo con fecha 16/12/2018 (a), 30/12/2018 (b), 5/01/2018 (c) y 17/01/2018 (d)

3.2.7. PROGRAMAS INFORMÁTICOS

Los programas empleados para el procesamiento de los datos fueron: *Eto Calculator* (v3.1, FAO, 2009) para el cálculo de evapotranspiración de referencia, *Image Canopy* (v3.6, CIP, 2017) para el cálculo del porcentaje de cobertura vegetal del cultivo e *InfoStat* (v2017, Di Rienzo, 2017) para el análisis estadístico. Además, el modelo a calibrar y validar fue el AquaCrop (v6.1, Raes *et al.*, 2018).

3.2.8. MÉTODOS

El experimento constó de la siembra de las tres variedades comerciales mencionadas en nueve parcelas para fines de calibración (7 de noviembre) y nueve parcelas para fines de validación (25 de octubre). En todas las parcelas, se empleó el plan de fertilización de 60N-54P₂O₅-46K₂O.

El área total del campo experimental fue de 518.4 m², correspondiente a las parcelas de calibración y validación (Figura 4).

Tabla 8: Características de las parcelas experimentales de calibración



Cultivo de quinua	Parcelas de calibración	
Área total del experimento	259.2 m ²	
Área experimental por variedad	28.8 m ²	
Número de surcos por parcela	8 surcos	
Longitud del surco	6 m	
Distanciamiento entre surcos	0.6 m	
Distanciamiento entre planta	0.1 m	

Tabla 9: Características de las parcelas experimentales de validación

Cultivo de quinua	Parcelas de validación	
Área total del experimento	259.2 m ²	
Área experimental por variedad	28.8 m ²	
Número de surcos por parcela	8 surcos	
Longitud del surco	6 m	
Distanciamiento entre surcos	0.6 m	
Distanciamiento entre planta	0.1 m	



Leyenda	
■	Parcela de calibración
■	Parcela de validación
P	Pasankalla
SI	Salcedo INIA
BJ	Blanca de Juli

Figura 7: Distribución de las parcelas experimentales para tres variedades de quinua (Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli)

3.3. MODELO AQUACROP

3.3.1. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS EN EL MODELO AQUACROP

En la siguiente tabla, se presentan los parámetros usados en la calibración:

Tabla 10: Descripción de parámetros del modelo AquaCrop

Símbolo	Descripción	Unidad
T_{base}	Temperatura base por debajo de la cual el desarrollo del cultivo no progresa	°C
T_{upper}	Temperatura superior por encima de la cual el desarrollo del cultivo ya no aumenta con un aumento de la temperatura	°C
$P_{exp,lower}$	Umbral superior del agotamiento del agua del suelo que limita la expansión del dosel	-
$P_{exp,upper}$	Umbral inferior del agotamiento del agua del suelo que limita la expansión del dosel	-
P_{sto}	Umbral superior del agotamiento del agua del suelo que limita la conductancia estomática	-
P_{sen}	Umbral superior del agotamiento del agua del suelo que limita la senescencia del dosel	-
P_{pol}	Umbral superior del agotamiento del agua del suelo que limita la polinización	-
$K_{c,Tr x}$	Coefficiente de cultivo cuando el dosel cubre completamente el terreno	-
Z_n	Profundidad mínimo de enraizamiento	m
Z_x	Profundidad máxima de enraizamiento	m
CC_0	Tamaño del dosel de la plántula promedio al 90 % de emergencia	cm ²
CGC	Coefficiente de crecimiento del dosel	%
CC_x	Cobertura máxima del dosel	%
CDC	Coefficiente de disminución del dosel	%
Dem	Días calendario desde la siembra a la emergencia	días
Dfl	Días calendario desde la siembra hasta la floración	días
Dflf	Duración de la etapa de floración	días
Dsen	Días calendario desde la siembra hasta la senescencia (maduración pastosa)	días
Dmad	Días calendario desde la siembra hasta la madurez (duración del ciclo de cultivo)	días
WP *	Productividad del agua normalizada	g/m ²

3.3.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP

El proceso de calibración del cultivo tuvo como datos de entrada mediciones del desarrollo del cultivo (días a la emergencia, días a la floración, días hasta la formación de grano pastoso y días a la maduración) y se ajustaron manualmente los parámetros del modelo con el fin de que la curva del desarrollo del dosel simulada se ajuste a lo observado en campo. La biomasa seca aérea simulada también fue comparada con las evaluaciones observadas en campo cada 30 días.

El coeficiente de transpiración del cultivo ($K_{c,Tr}$), la productividad del agua del cultivo durante la formación del rendimiento, la cobertura inicial del dosel (CC_0) y los parámetros que representan el estrés hídrico (umbrales de agotamiento del agua del suelo que limita la expansión de la cubierta, el cierre estomático y la senescencia del dosel) se tomaron de

acuerdo a los parámetros predeterminados por el modelo AquaCrop (Raes *et al.*, 2018). La curva CC tiene una especial importancia tanto en el modelamiento de la transpiración del cultivo y en la evaporación del agua del suelo. Los parámetros que determinan la curva CC, como: CC_x , CGC y CDC fueron estimados por pruebas de error y ensayo. Este proceso es repetido iterativamente de tal manera que se llegue a la aproximación más cercana ente los datos simulados y los valores observados durante el periodo experimental de cada una de las unidades experimentales (Steduto *et al.*, 2012).

3.3.3. VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP

El modelo AquaCrop se validó utilizando los parámetros calibrados; y los datos simulados se compararon con los datos obtenidos de cada uno de los tratamientos de las parcelas destinadas a validación en la localidad de Taraco, Puno.

3.3.4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL MODELO AQUACROP

La eficiencia del modelo se evaluó en las variables CC y B, en términos del coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE), el índice de concordancia de Willmot (d) y el coeficiente de eficiencia (EF) del modelo Nash-Sutcliffe (Moriassi *et al.*, 2007; Steduto *et al.*, 2012).

a. Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2) describe la proporción de la varianza en medida de datos explicados por el modelo. R^2 varía de 0 a 1, con mayores valores que indican menor varianza de error, y valores típicos superiores a 0.5 se consideran aceptables (Santhi *et al.*, 2001, Van Liew *et al.*, 2003 citado por Moriassi *et al.*, 2007).

b. Raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)

El RMSE (raíz del error cuadrático medio) mide la magnitud promedio de la diferencia entre predicciones y observaciones; sin embargo, debido a que se expresa en unidades de la variable estudiada, no permite modelar pruebas bajo una amplia gama de condiciones meteorológicas y climáticas (Jacovides & Kontoyiannis, 1995). El RMSE se puede normalizar utilizando la media de los valores observados (M); por lo tanto, el RMSE normalizado (NRMSE) expresado en porcentaje da una indicación de la diferencia relativa

entre el modelo y las observaciones. La simulación se considera como “excelente o muy bueno”, con un NRMSE menor de 10%, es “bueno” cuando el NRMSE normalizado es superior a 10% pero menor que 20%, es “justo o aceptable” si el NRMSE normalizado es mayor que 20% y menor a 30%, y “malo” si es mayor a 30% (Jamieson, 1991).

$$\text{NRMSE} = \frac{1}{M} \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} * 100$$

c. Índice de concordancia de Willmott (d)

El índice de concordancia (d) propuesto por Willmott (1982), indica que mientras más cercano este a uno, mejor será la comparación entre las dos variables (simulada y observada).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2}$$

d. Eficiencia del modelo (EF)

Para probar la calidad del modelo, se usará la eficiencia del modelo (EF- no dimensional). El cual es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos.

El EF se acerca a uno cuando la varianza residual es mucho menor que la varianza de datos medidos, mientras que los valores negativos de EF indican que la media es un mejor estimador que el modelo (Moriassi *et al.*, 2007).

$$\text{EF} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - M)^2}$$

En las ecuaciones de NRMSE, índice de concordancia, y eficiencia del modelo, “n” representa el número de observaciones, σ es la desviación estándar, “Pi” es la observación predicha, “Oi” es la observación medida, $P_i' = P_i - M$ y $O_i' = O_i - M$, siendo “M” la media de la variable observada.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo está destinado a presentar y analizar los diversos resultados obtenidos en los experimentos, respecto a las evaluaciones fenológicas y de rendimiento, así como en la calibración y validación del modelo AquaCrop.

4.1. EVALUACIONES DE FENOLOGÍA Y DE RENDIMIENTO DEL CULTIVO

Las evaluaciones fenológicas consistieron en contar el número de días desde la siembra hasta la emergencia, el número de días desde la siembra hasta la floración, el número de días desde la siembra hasta la formación de grano pastoso y el número de días desde la siembra hasta la maduración de cosecha. Asimismo, se evaluó la biomasa seca área cada 30 días a lo largo del crecimiento del cultivo y el rendimiento de grano a la cosecha.

4.1.1. NÚMERO DE DÍAS A LA EMERGENCIA

Se analizó estadísticamente los días desde la siembra hasta la emergencia (días desde la siembra hasta que el 50 por ciento de plantas alcanzó esta fase) para las tres variedades de quinua. En las parcelas de calibración, al no presentar una distribución normal (requisito para utilizar la prueba paramétrica ANOVA), se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, la cual permite una comparación de medianas poblaciones del número de días a la emergencia.

En la Tabla 11 se presentan los valores medios del número de días a la emergencia de las variedades de quinua sembradas en las parcelas de calibración. Según los resultados de la prueba de Kruskal Wallis se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas (Ver Anexo 2).

En la Tabla 12 y se presentan los valores medios del número de días a la emergencia de las variedades de quinua sembradas en las parcelas de validación. Según el análisis estadístico de la varianza (ANOVA) se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas (Ver Anexo 3).

Esto concuerda con lo encontrado por García-Parra *et al.* (2020), quien reportó en un estudio a escala global que el tiempo fisiológico tuvo un comportamiento similar en la fase de emergencia entre diferentes cultivares de quinua.

El rango de número días varió de 10 a 12 días para las tres variedades en las parcelas destinadas a calibración; de 14 a 16 días para la variedad Salcedo INIA y de 14 a 18 días para las variedades Pasankalla y Blanca de Juli en las parcelas destinadas a validación. En el caso de los valores obtenidos en las parcelas de calibración, la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad son iguales en todas las variedades, y es debido a que se contó con una pequeña cantidad de repeticiones (3). Mujica *et al.* (1989) indica que la emergencia se da entre los 7 y 10 después de la siembra. Similares valores de días a la emergencia (7 a 10) para las variedades utilizadas fueron reportados en el catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú (Apaza *et al.*, 2013).

Tabla 11: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la emergencia de las parcelas de calibración

Variedades	\bar{x}	Mínimo	Máximo	s	CV
Pasankalla	10.67	10.00	12.00	1.15	10.83
Salcedo INIA	10.67	10.00	12.00	1.15	10.83
Blanca de Juli	10.67	10.00	12.00	1.15	10.83
Total	10.67	10.00	12.00	1.15	10.83

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

Tabla 12: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la emergencia de las parcelas de validación

Variedades	\bar{x}	Mínimo	Máximo	s	CV
Pasankalla	15.33	14.00	18.00	2.31	15.06
Salcedo INIA	14.67	14.00	16.00	1.15	7.87
Blanca de Juli	15.33	14.00	18.00	2.31	15.06
Total	15.11	14.00	17.33	1.92	12.67

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

4.1.2. NÚMERO DE DÍAS A LA FLORACIÓN

Se analizó estadísticamente los días desde la siembra hasta la floración para las tres variedades de quinua.

En la Tabla 13 y Tabla 14 se presentan los valores medios del número de días desde la siembra hasta que el 50 por ciento de plantas alcanzó la floración de las parcelas con fines de calibración y validación respectivamente. Según el análisis estadístico de la varianza (ANOVA) se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas dentro de las parcelas de calibración y validación (Ver Anexos 4 y 5).

El rango de número días varió de 95 a 97 días en las parcelas de calibración y de 86 a 91 días en las parcelas de validación. El tiempo a floración observado por Mendoza (2012) en accesiones de quinua bajo condiciones de día largo (15 hd^{-1}) fue entre 78 a 103 días. Mujica (2006) menciona que la plena floración ocurre entre los 90 y 100 días. Estudios realizados por Pulvento *et al.* (2012) encontraron que los días a la floración se da entre los 61 y 65 días bajo diferentes condiciones de riego salino y no salino. Por otro lado, Abdalla *et al.* (2020) indicaron que la quinua exhibe un patrón de crecimiento diferente en respuesta a diferentes genotipos, técnica de plantación y densidad de siembra; y que el rango de variación de los caracteres morfológicos, fenológicos y agronómicos se debe a la gran variabilidad varietal. El mismo estudio encontró que para la variedad Pasankalla sembrada tradicionalmente, el tiempo hasta floración fue de 43.7 días; mientras que, sembradas a una densidad de 133 333 plantas por hectárea fue de 50.3 días en Burkina Faso, África. En esa misma línea, Sajjad *et al.* (2014) encontró que los días a la floración variaron de acuerdo a la fecha de siembra, con valores de 46.56 a 55.89 días en Pakistán. Los tiempos hasta el florecimiento del presente estudio coinciden con Mujica (2006) y con el rango registrado por Steduto *et al.* (2012) quien señala que la floración se da entre los 60 y 120 días.

Tabla 13: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la floración de las parcelas de calibración

Variedades	\bar{x}	Mínimo	Máximo	s	CV
Pasankalla	95.67	95.00	97.00	1.15	1.21
Salcedo INIA	96.67	96.00	98.00	1.15	1.19
Blanca de Juli	97.33	96.00	99.00	1.53	1.57
Total	96.56	95.67	98.00	1.28	1.32

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

Tabla 14: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la floración de las parcelas de validación

Variedades	\bar{x}	Mínimo	Máximo	s	CV
Pasankalla	89.67	89.00	90.00	0.58	0.64
Salcedo INIA	88.33	86.00	91.00	2.52	2.85
Blanca de Juli	89.00	86.00	91.00	2.65	2.97
Total	89.00	87.00	90.67	1.91	2.16

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

4.1.3. NÚMERO DE DÍAS A LA FORMACIÓN DE GRANO PASTOSO

Se analizó estadísticamente los días desde la siembra hasta la formación de grano pastoso para las tres variedades de quinua.

En la Tabla 15 y 16 se presentan los valores medios del número de días desde la siembra hasta que el 50 por ciento de plantas alcanzó la formación de grano pastoso de las parcelas con fines de calibración y validación respectivamente. Según el análisis estadístico de la varianza (ANOVA) se concluye que no existen diferencias estadísticamente de significancia dentro de las parcelas de calibración y validación (Anexo 6 y 7).

El rango de número días varió de 139 a 144 días en las parcelas de calibración y de 135 a 140 en las parcelas de validación. Estos valores se encuentran dentro del rango encontrado por Mujica (2006), quien indica que la formación del grano pastoso ocurre entre los 130 a 160 días. De acuerdo a Gómez & Aguilar (2016) en la fase de grano masoso los frutos al ser presionados presentan la consistencia pastosa y en esta fase la planta alcanza la madurez fisiológica. Por lo tanto, los resultados encontrados en este estudio tendrían consistencia con los reportado por Steduto *et al.* (2012), quien menciona que el tiempo desde la emergencia hasta la madurez fisiológica varía entre 100 y 230 días debido a una gran variación entre variedades. En esa misma línea, variedades sembradas en Reino Unido provenientes del

Perú, reportaron días a la maduración fisiológica de 152 a 158 según variaciones en la distancia y tasa de siembra (g semilla/m) (Risi & Galwey, 1991).

Tabla 15: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la formación de grano pastoso de las parcelas de calibración

Variedades	\bar{x}	Mínimo	Máximo	s	CV
Pasankalla	142.33	139.00	144.00	2.89	2.03
Salcedo INIA	142.00	141.00	143.00	1.00	0.70
Blanca de Juli	141.33	139.00	143.00	2.08	1.47
Total	141.89	139.67	143.33	1.99	1.40

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

Tabla 16: Valor medio, mínimo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la formación de grano pastoso de las parcelas de validación

Variedades	\bar{x}	Mínimo	Máximo	s	CV
Pasankalla	136.67	135.00	139.00	2.08	1.52
Salcedo INIA	139.00	138.00	140.00	1.00	0.72
Blanca de Juli	139.00	138.00	140.00	1.00	0.72
Total	138.22	137.00	139.67	1.36	0.99

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

4.1.4. NÚMERO DE DÍAS A LA MADURACIÓN DE COSECHA

Se analizó estadísticamente los días desde la siembra hasta que alcanzó la maduración para las tres variedades de quinua.

En la Tabla 17 se presentan los valores medios del número de días a la maduración de cosecha de las variedades de quinua destinadas a calibración. Según el análisis estadístico de la varianza (ANOVA) se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas (Ver Anexo 8).

En la Tabla 18 se presentan los valores medios del número de días a la maduración de las variedades de quinua destinadas a validación. Según el análisis estadístico de la varianza (ANOVA) se concluye que sí existen diferencias estadísticamente de significancia entre las variedades Pasankalla - Salcedo INIA y las variedades Pasankalla - Blanca de Juli (Ver Anexo 9). La variedad más tardía fue Blanca de Juli y la más precoz Pasankalla. Lo cual coincide con lo reportado por Apaza *et al.* (2013), quien indica que la variedad Blanca de Juli es semi precoz.

El rango del número días varió de 170 a 174 días en las parcelas de calibración y de 168 a 175 en las parcelas de validación. Según el cultivar y el lugar de origen, el periodo de crecimiento en América del Sur varía de 160 a 190 días (Jacobsen & Stølen, 1993). Jacobsen (1997) en el norte de Europa (Dinamarca) encontró que el periodo total de crecimiento oscilo entre 109 y 182 días. Asimismo, Jacobsen (1998) reportó que bajo una densidad de siembra de 200 plantas/m² obtuvo un promedio del periodo de crecimiento del cultivo entre 126 y 157 días durante 3 años en Dinamarca. Talebnejad & Sepaskhah (2015) reportaron 109 días bajo condiciones de agua subterránea salina y riego deficitario en invernadero en Irán. Por otro lado, Mujica (2006) menciona que la maduración del cultivo ocurre de los 160 a 180 días después de la siembra, y en la variedad Salcedo INIA en Perú, después de 160.5 días (Mujica *et al.*, 2001). Lo encontrado en el presente estudio concuerda con lo reportado por Mujica (2006), Jacobsen & Stølen (1993) y Jacobsen (1997).

Tabla 17: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la maduración de las parcelas de calibración

Variedades	\bar{x}	Mínimo	Máximo	s	CV
Pasankalla	171.33	170.00	172.00	1.15	0.67
Salcedo INIA	170.33	170.00	171.00	0.58	0.34
Blanca de Juli	172.67	171.00	174.00	1.53	0.88
Total	171.44	170.33	172.33	1.09	0.63

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

Tabla 18: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del número de días a la maduración de las parcelas de validación

Variedades	\bar{x}	Mínimo	Máximo	s	CV
Pasankalla	169.00	168.00	170.00	1.00	0.59
Salcedo INIA	173.33	172.00	175.00	1.53	0.88
Blanca de Juli	174.00	173.00	175.00	1.00	0.57
Total	172.11	171.00	173.33	1.18	0.68

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

4.1.5. BIOMASA SECA AÉREA

Se analizó estadísticamente la biomasa seca área medida cada 30 días de las tres variedades de quinua.

En la Tabla 19 y 20 se presentan los valores medios de la biomasa seca área de las variedades de quinua sembradas destinadas a calibración y validación respectivamente. Según el análisis estadístico de la varianza (ANOVA) para los valores de (30, 60, 90 y 150 días) y la prueba de Kruskal Wallis (120 días) se concluye que no existen diferencias estadísticamente de significancia (Ver Anexos del 10 al 19) entre las variedades destinadas a la parcela de calibración y validación del modelo.

Mujica *et al.* (2001) citado por Bertero *et al.* (2004) evaluó la biomasa aérea seca de un conjunto de cultivares de quinua obteniendo valores desde 7.214 a 11.247 Mg.ha⁻¹ en el Altiplano peruano. Los datos encontrados en el presente estudio se encuentran dentro del rango determinado por Mujica *et al.* (2001).

Tabla 19: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad de la biomasa seca área (Mg·ha⁻¹) medida en todo el cultivo cada 30 días de las parcelas de calibración

Variedad		DDS				
		30	60	90	120	150
Pasankalla	\bar{x}	0.43	2.05	4.19	6.41	7.39
	Mínimo	0.38	1.99	4.04	6.21	7.06
	Máximo	0.49	2.13	4.27	6.68	7.98
	s	0.05	0.07	0.13	0.25	0.51
	CV	12.56	3.53	3.08	3.83	6.88
Salcedo INIA	\bar{x}	0.36	1.94	3.66	6.27	7.56
	Mínimo	0.28	1.71	3.07	5.88	7.19
	Máximo	0.51	2.14	3.97	6.69	8.06
	s	0.13	0.22	0.52	0.41	0.45
	CV	34.94	11.22	14.10	6.53	5.92
Blanca de Juli	\bar{x}	0.47	2.03	3.58	6.29	7.22
	Mínimo	0.38	1.93	3.07	5.53	7.08
	Máximo	0.57	2.14	3.89	6.71	7.36
	s	0.10	0.11	0.44	0.65	0.14
	CV	20.45	5.26	12.44	10.39	1.93

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

Tabla 20: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad de la biomasa seca área (Mg·ha⁻¹) medida en todo el cultivo cada 30 días de las parcelas de validación

Variedad		DDS				
		30	60	90	120	150
Pasankalla	\bar{x}	0.45	1.96	3.51	6.44	7.91
	Mínimo	0.34	1.79	3.04	6.05	7.36
	Máximo	0.53	2.04	4.01	6.69	8.27
	s	0.10	0.14	0.49	0.34	0.49
	CV	21.42	7.22	13.87	5.30	6.14
Salcedo INIA	\bar{x}	0.53	1.88	3.45	6.40	7.92
	Mínimo	0.40	1.56	3.21	6.18	7.60
	Máximo	0.64	2.28	3.89	6.58	8.44
	s	0.12	0.37	0.38	0.20	0.46
	CV	23.23	19.72	11.13	3.17	5.76
Blanca de Juli	\bar{x}	0.51	2.06	3.47	6.52	7.62
	Mínimo	0.41	1.83	3.33	6.29	7.39
	Máximo	0.63	2.46	3.57	6.87	7.95
	s	0.11	0.35	0.12	0.31	0.29
	CV	21.23	16.89	3.51	4.77	3.86

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

4.1.6. RENDIMIENTO

Se analizó estadísticamente el rendimiento de las tres variedades de quinua. En la Tabla 21 y 22 se presentan los valores medios del rendimiento de las variedades de quinua sembradas destinadas a calibración y validación respectivamente. Según el análisis estadístico de la varianza (ANOVA) se concluye que si existen diferencias estadísticamente de significancia (Ver Anexo 20) en las parcelas de calibración entre todas las variedades, y no existe diferencia significativa en las parcelas de validación entre todas las variedades, pero si entre las variedades Pasankalla y Blanca de Juli (Ver Anexo 21).

El rendimiento varió de 0.89 a 2.03 Mg·ha⁻¹ en las parcelas de calibración y de 1.01 a 1.58 Mg·ha⁻¹ en las parcelas de validación. En las parcelas de calibración con fecha de siembra el 7 de noviembre del 2018, la variedad Pasankalla obtuvo el mayor rendimiento y la variedad Salcedo INIA el menor. Los valores de rendimiento encontrados en el presente estudio son inferiores a los reportados por Apaza *et al.* (2013), quien reporto valores de 3.54 Mg·ha⁻¹ para Pasankalla, 2.5 Mg·ha⁻¹ en Salcedo INIA y de 1.5 a 2 Mg·ha⁻¹ para Blanca de Juli; esto posiblemente debido al ataque de mildiu observado en la fase de ramificación,

que conforme con (Danielsen *et al.*, 1999; Danielsen & Munk, 2004 citado por Hirich *et al.* 2014) el mildiu vellosa es el patógeno más severo en la quinua y se sabe que causa una reducción del rendimiento de 33 a 58 %, incluso en el cultivares más resistentes. De acuerdo a Mujica *et al.* (2001), bajo condiciones de secano en el Altiplano, la producción de quinua no excede los 0.85 Mg.ha⁻¹.

En las parcelas de validación con fecha de siembra el 25 de octubre, la variedad Blanca de Juli obtuvo el mayor rendimiento y la variedad Pasankalla el menor, y también se registró ataque de mildiu en la fase de desarrollo de panoja y floración. Esta obtención de rendimiento mayor y menor en una variedad sembrada bajo diferentes fechas de siembra podría indicar que la fecha de siembra tendría efecto en el rendimiento de una variedad en específico. Sin embargo, estudios realizados por Alvar *et al.* (2019) en Marruecos encontró que no se observaron grandes diferencias en la fenología y fisiología de las plantas de quinua entre las diferentes fechas de siembra, lo cual no fue caso de estudio en la presente investigación. Por otro lado, de acuerdo a Bertero *et al.* (2004) y Curti *et al.* (2014) citado por Sadras & Calderini (2021) la variación en la duración del desarrollo del cultivo de quinua es uno de los principales determinantes de las interacciones de GxExM (genotipo, medio ambiente y manejo del cultivo) en el rendimiento.

Tabla 21: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del rendimiento de grano (Mg·ha⁻¹) de las parcelas de calibración

Variedades	\bar{x}	Mínimo	Máximo	s	CV
Pasankalla	1.75	1.61	2.03	0.24	13.88
Salcedo					
INIA	1.02	0.89	1.15	0.13	12.58
Blanca de					
Juli	1.51	1.41	1.61	0.10	6.59
Total	1.42	1.30	1.59	0.16	11.02

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar (n=3) y CV es el coeficiente de variabilidad

Tabla 22: Valor medio, mínimo, máximo, desviación estándar y coeficiente de variabilidad del rendimiento de grano ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de las parcelas de validación

Variedad	\bar{x}	Mínimo	Máximo	σ	CV
Pasankalla	1.10	1.01	1.15	0.07	6.57
Salcedo					
INIA	1.15	1.06	1.19	0.08	6.73
Blanca de					
Juli	1.40	1.24	1.58	0.17	11.99
Total	1.21	1.10	1.31	0.11	8.43

\bar{x} es la media, s es la desviación estándar ($n=3$) y CV es el coeficiente de variabilidad

4.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP

La gran variabilidad genética del cultivo de quinua, con miles de genotipos hacen que la calibración del modelo AquaCrop sea más complejo, tal como lo reporta Alvar-Beltrán *et al.* (2021) en su estudio de parametrización de quinua bajo ambientes áridos. En la Tabla 23 se presentan los parámetros con los valores predeterminados por el modelo AquaCrop y la comparación con los valores calibrados obtenidos en el presente estudio.

En la calibración se consideró la T_{base} de 1°C debido a que en un estudio elaborado por Bois *et al.* (2006) muestra que la temperatura base para la germinación varió entre -1.9°C y $+0.2^\circ\text{C}$, y señala que la T_{base} puede variar dependiendo de la etapa fenológica del cultivo encontrando que la aparición de las hojas y el tiempo de floración mostraron temperaturas base cercanas a 1°C . Estos valores coinciden con Mamedi *et al.* (2017), quien menciona que la T_{base} para la germinación en cultivares de tierras altas es de 1°C . Otros estudios reportaron T_{base} de 3°C para germinación (Jacobsen & Bach, 1998 citado por García-Parra *et al.*, 2020).

Se calibró con una temperatura superior (T_{upper}) de 30°C , debido a que diversos estudios indican que la quinua tolera máximos de temperatura de 30°C (Bazile *et al.*, 2014 citado por García-Parra *et al.*, 2020); además, valores por encima de 35°C han mostrado incremento en el porcentaje de aborto de flores y desarrollo de semillas sin perispermo o cotiledón (Murphy & Matanguihan, 2015).

El tamaño del dosel de la plántula promedio al 90% de emergencia (cc_0) fue de 6.5 cm^2 /planta de acuerdo a Raes *et al.* (2018) y la siembra se realizó con distancia entre filas de 0.6 m y entre plantas de 0.1 m (densidad de 166 667 plantas por hectárea).

El CGC en las variedades Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli fueron 7.06, 6.2 y 6.85%/día, respectivamente. El CGC de 7.06% significa que cada día la cobertura del dosel creció en un 7.06 % durante la primera mitad del desarrollo del dosel, el valor referido por Raes *et al.* (2018) fue de 10%.

El CDC en las variedades Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli fueron 5.33, 5.46 y 5.4%/día, respectivamente, el valor referido por Raes *et al.* (2018) fue de 10%.

La CC_x fue de 82% para todas las variedades. Geerts *et al.* (2009) encontró valores de 70% para condiciones del Altiplano sur y centro de Bolivia, y Raes, *et al.* (2018) reportó valores de 50 a 100%.

Los GDD se calcularon con la T_{base} de 1°C. Esta unidad de calor permite conocer cuánto demora un cultivo en alcanzar una etapa fenológica. Los GDD desde la siembra hasta la madurez en las variedades Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli fueron 1630, 1630 y 1639 respectivamente. Valores cercanos fueron encontrados por Alvar *et al.* (2019) en Marruecos, que de acuerdo a la fecha de siembra se calcularon valores de 1785.5 a 1919.8 GDD. García-Parra *et al.* (2020) encontraron que la acumulación de los GDD durante las fases reproductivas muestra gran dispersión, encontrando valores de aproximadamente 1100 a 3400 hasta la fase de maduración según la variedad. Robertson *et al.* (2009); Azam-Ali & Squire (2002), y McMaster & Wilhelm (2003) citado por Geerts *et al.* (2009) mencionaron que el estrés hídrico puede tener un efecto considerable en las sumas de GDD para la floración y madurez fisiológica. Por lo que, para superar este inconveniente es importante desvincular las condiciones vegetativas y reproductivas en el desarrollo de la quinua (cultivo indeterminado) en el proceso de calibración. Esto permitiría que el cultivo de quinua simulado continúe creciendo durante la floración y llenado de grano, aunque esto podría no ser una exacta representación fisiológica de lo que sucede en la realidad (Bertero, 2007, comunicación personal; Geerts *et al.*, 2008 citado por Geerts *et al.*, 2009). Este proceso de desvinculación fue considerado en la calibración del presente estudio.

La profundidad máxima efectiva de las raíces (Z_x) corresponde a la profundidad máxima del suelo en la cual la planta puede extraer agua (Steduto *et al.*, 2012) y fue calibrada con 0.47, 0.50 y 0.51 m en las variedades Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli respectivamente. La Z_x Geerts *et al.* (2009) bajo condiciones del centro y sur del Altiplano boliviano reporto valores de 0.3 y 0.6 m respectivamente.

El coeficiente de transpiración del cultivo cuando el dosel cubre completamente el terreno ($K_{c,Trx}$) fue calibrado con 1.1, y fue tomado de acuerdo a los parámetros predeterminados por el modelo AquaCrop (Raes *et al.*, 2018). La productividad del agua normalizada del cultivo (WP*) fue de 10.5 g/m², que, como cultivo C3, suele ser baja, con valores típicos alrededor de 10.5 g/m² reportado en condiciones de baja fertilidad natural en Altiplano boliviano Geerts *et al.* (2009) y como también lo propone Raes *et al.* (2018).

Tabla 23: Valores predeterminados y parámetros calibrados en el modelo AquaCrop para las tres variedades del cultivo de quinua

Símbolo	Valores predeterminados	Pasankalla	Salcedo INIA	Blanca de Juli
T_{base}	2	1	1	1
T_{upper}	30	30	30	30
$P_{exp,lower}$	0.5	0.50	0.50	0.50
$P_{exp,upper}$	0.8	0.80	0.80	0.80
P_{sto}	0.6	0.60	0.60	0.60
P_{sen}	0.98	0.98	0.98	0.98
P_{pol}	0.90	0.90	0.90	0.90
$K_{c,Tr x}$	1.1	1.10	1.10	1.10
Z_n	0.3	0.30	0.30	0.30
Z_x	1	0.47	0.50	0.51
cc_o	6.5	6.50	6.50	6.50
CGC	10	7.06	6.92	6.85
CC_x	75	82	82	82
CDC	10	5.33	5.46	5.40
Dem	7	9	11	11
Dfl	70	91	95	96
Dffl	20	18	18	18
Dsen	160	140	143	142
Dmad	180	170	170	171
WP *	10.5	10.50	10.50	10.50

El ajuste de la calibración se midió con los indicadores estadísticos determinados por Moriasi *et al.* (2007) y Steduto *et al.* (2012). En la Tabla 24, se presentan los valores de los indicadores estadísticos encontrados para la CC y B de las tres variedades de quinua calibradas.

Tabla 24: Indicadores estadísticos de eficiencia en la calibración cuando se compara los valores observados y simulados de la cobertura del dosel (%) y la biomasa seca aérea (Mg·ha⁻¹)

Índice de Eficiencia	Pasankalla		Salcedo INIA		Blanca de Juli	
	CC	B	CC	B	CC	B
NRMSE (%)	18.71	20.91	16.79	18.84	17.53	22.82
EF	0.89	0.89	0.91	0.92	0.90	0.88
d	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97	0.98
R ²	0.90	0.96	0.92	0.98	0.91	0.97

De acuerdo a los criterios de evaluación del modelo citados en el ítem 3.15, los resultados indican que el AquaCrop presenta un desempeño de “bueno” con NRMSE<20%, EF>0.75, d>0.90 y R²>0.5 para cobertura del dosel. De “bueno” a “aceptable o justo” con 10%<NRMS<30%, EF>0.75, d>0.90 y R²>0.5 para biomasa seca área medida lo largo del crecimiento del cultivo, lo cual permite tener una mejor precisión de la biomasa evaluada.

Geerts *et al.* (2009) encontró valores de desempeño de EF = 0.38 y R² = 0.73 para la calibración de la cobertura del dosel bajo condiciones de déficit de irrigación en el Altiplano boliviano; y NRMSE = 16%, EF y R² = 0.91 para la biomasa seca área al final de la cosecha. Estudios realizados por Alvar-Beltrán *et al.* (2021), reportaron valores de NRMSE = 11.4% y R² = 0.94 para la calibración de la biomasa seca área en Sahel, África. De acuerdo con Van Gaelen *et al.* (2015) los valores de RRMSE y R² fueron 25.2% y 0.97 respectivamente para la biomasa seca área en parcelas estresadas por fertilidad en Patacamaya, Bolivia. Los resultados obtenidos en el presente estudio se ajustan a los encontrados por Van Gaelen *et al.* (2015), debido a que el plan de fertilidad tomado como referencia en el presente estudio fue basado en la dosis de empleo que el agricultor promedio realiza en la zona de Taraco, lo cual implica una fertilidad baja.

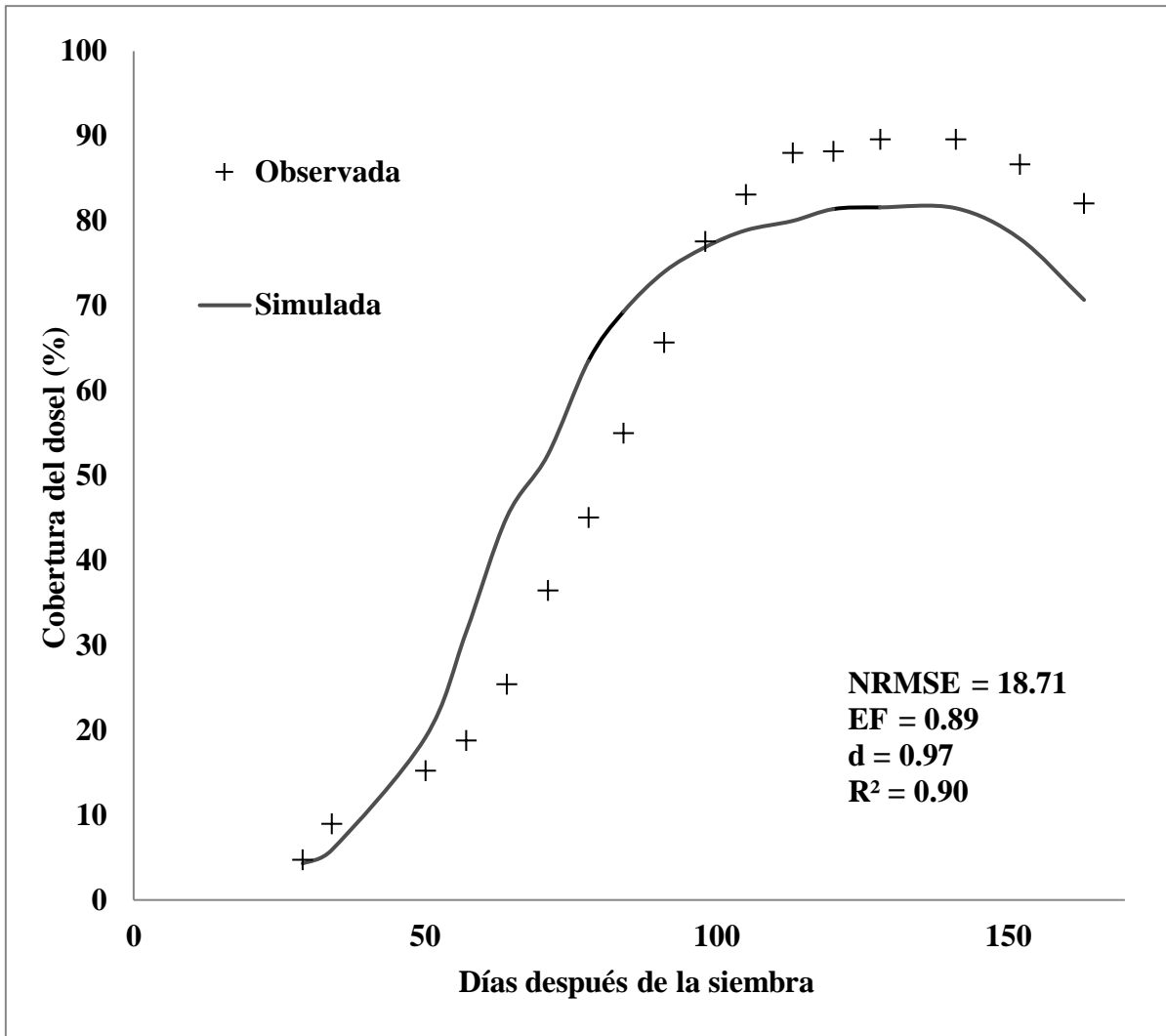


Figura 8: Cobertura del dosel (CC) simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la calibración de la variedad Pasankalla

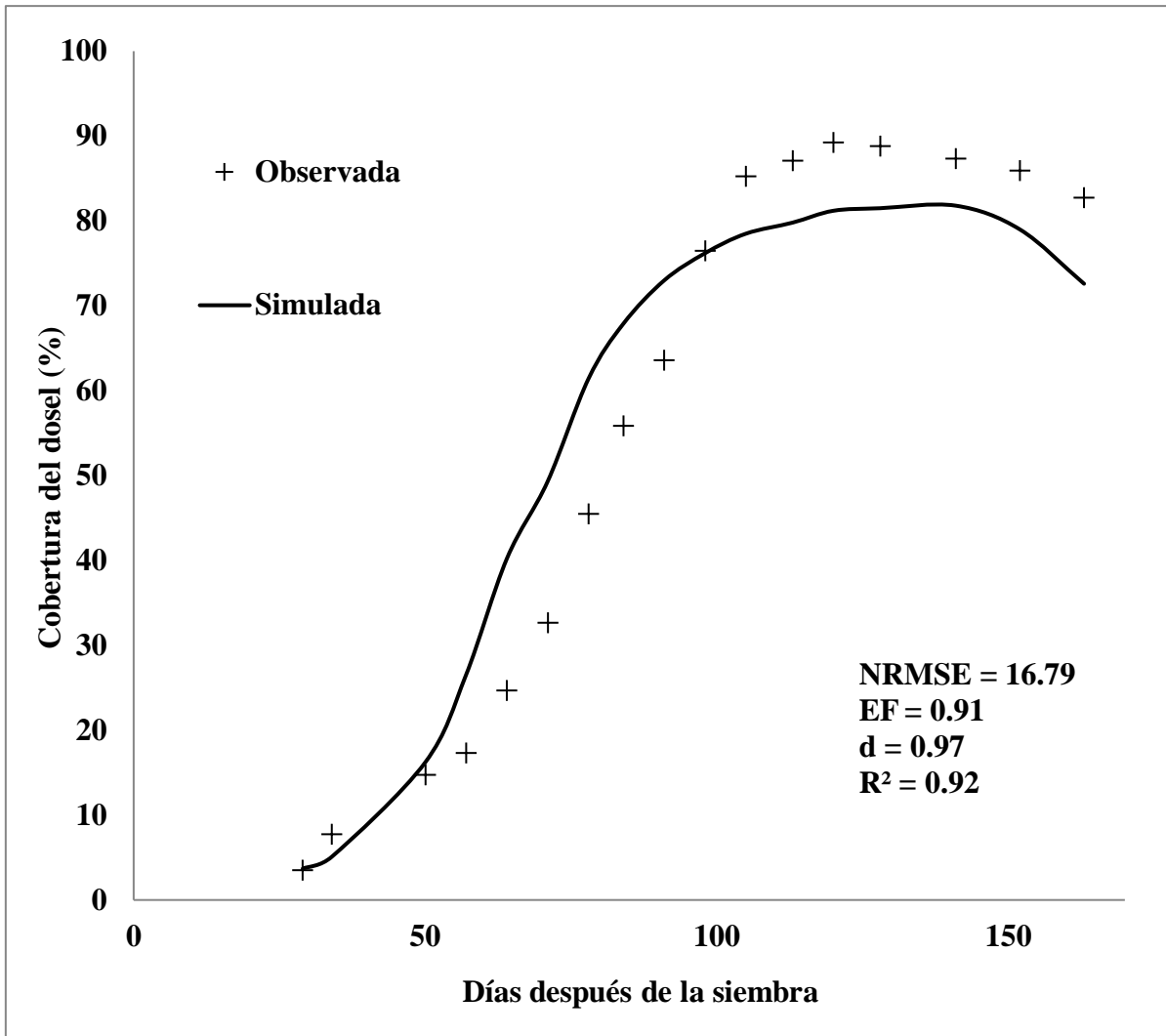


Figura 9: Cobertura del dosel simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la calibración de la variedad Salcedo INIA

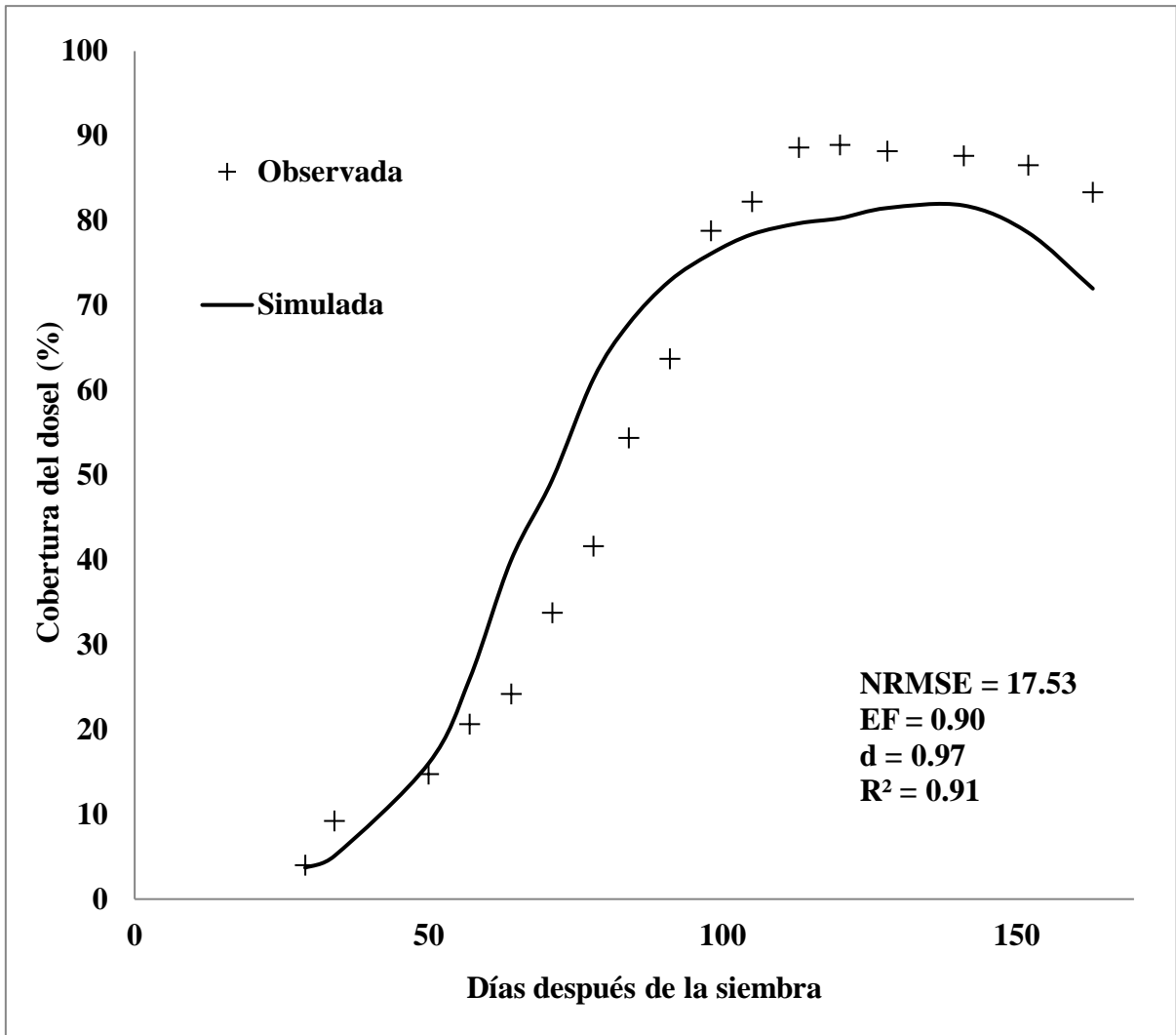


Figura 10: Cobertura del dosel simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la calibración de la variedad Blanca de Juli

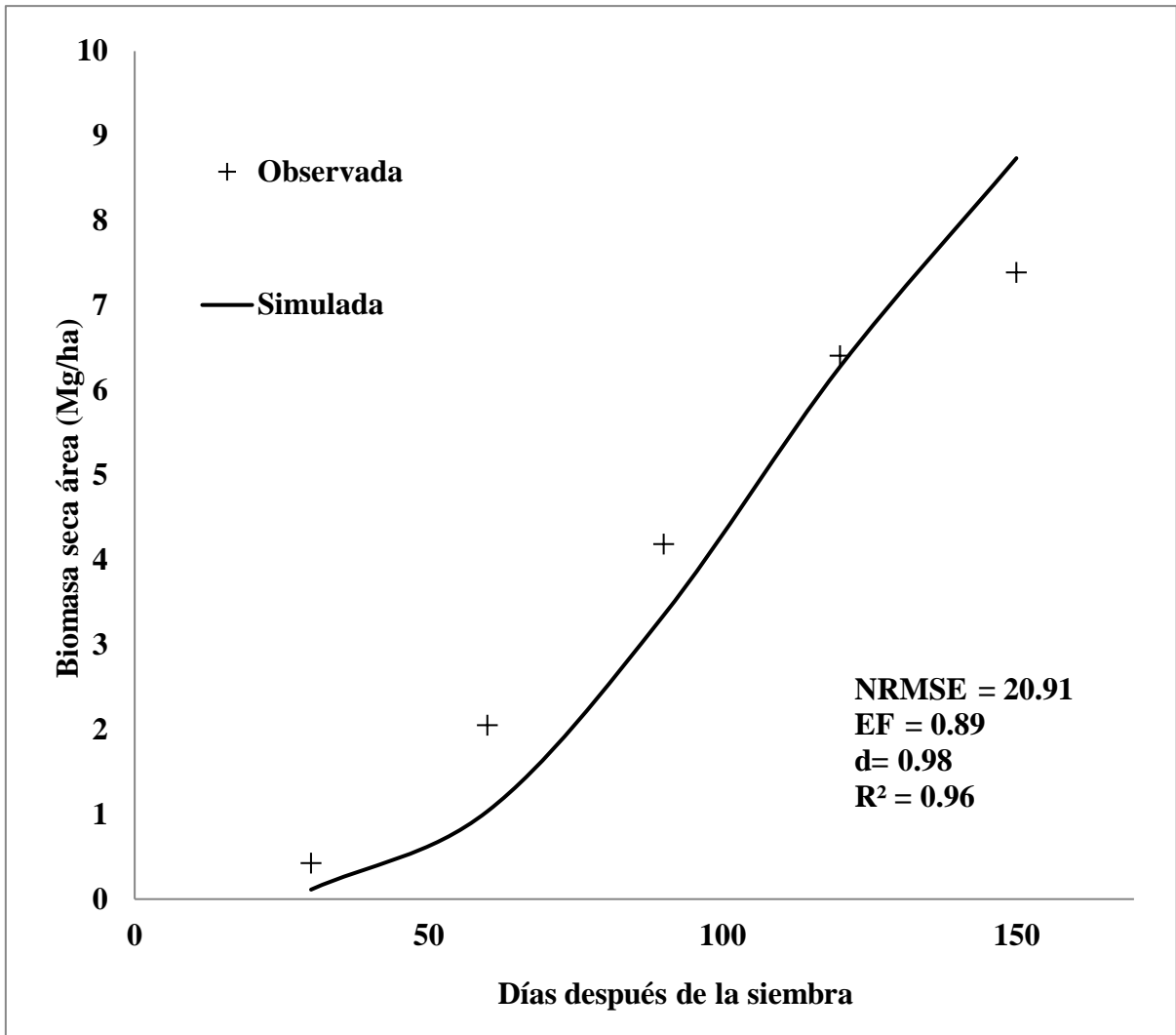


Figura 11: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la calibración de la variedad Pasankalla

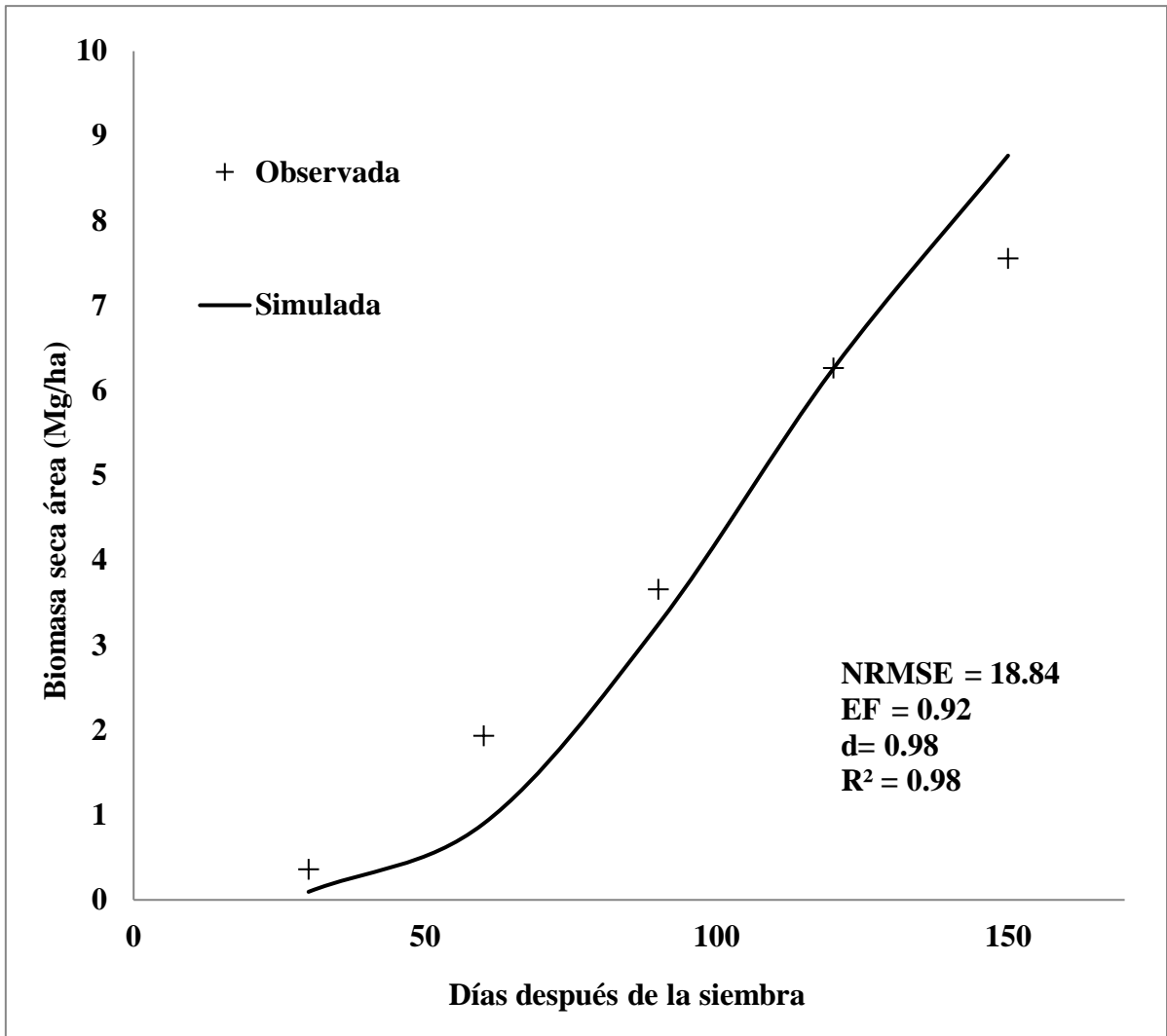


Figura 12: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la calibración de la variedad Salcedo INIA

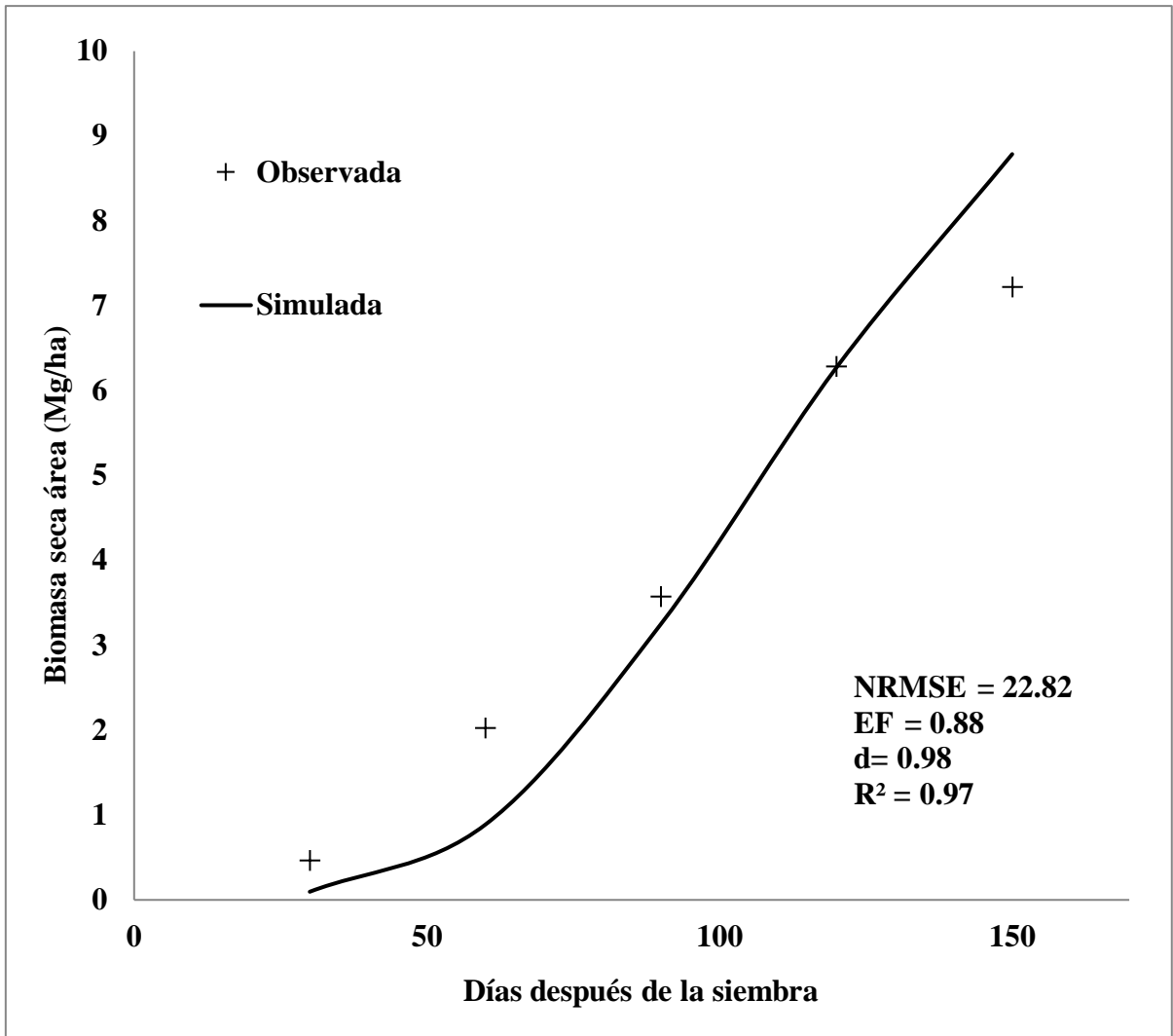


Figura 13: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la calibración de la variedad Blanca de Juli

4.3. VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP

Con el fin de medir la precisión con la que el modelo puede reproducir las variables observadas, se utilizaron los valores obtenidos en la calibración (Tabla 23), y fueron puestos a prueba en parcelas de una época de siembra distinta (25 de octubre del 2018).

La eficiencia de la validación se midió con los indicadores estadísticos determinados por Moriasi *et al.* (2007) y Steduto *et al.* (2012). En la Tabla 25 se presentan los valores encontrados para la CC y biomasa seca área (B) de las tres variedades de quinua validadas.

Tabla 25: Indicadores estadísticos de eficiencia en la validación cuando se compara los valores observados y simulados de la cobertura del dosel (%) y la biomasa seca aérea ($Mg \cdot ha^{-1}$)

Índice de Eficiencia	Pasankalla		Salcedo INIA		Blanca de Juli	
	CC	B	CC	B	CC	B
NRMSE (%)	15.74	28.52	14.41	24.72	14.64	26.63
EF	0.87	0.83	0.90	0.87	0.90	0.99
d	0.97	0.95	0.98	0.97	0.98	0.99
R ²	0.97	0.97	0.96	0.98	0.97	0.97

De acuerdo a los criterios de evaluación del modelo citados en el ítem 3.15, estos resultados indican que el modelo AquaCrop presenta un desempeño de predicción “bueno” con $NRMSE < 20\%$, $EF > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$ para cobertura del dosel. Ello significa que los valores de cobertura del dosel simulados presentan una buena correlación con los datos reales en todas las variedades. Sin embargo, al analizar las gráficas durante todo el desarrollo del cultivo, se encontró que hacia la senescencia la simulación es caracterizada por un rápido declive de la cobertura del dosel en las parcelas de validación y calibración; mientras que, durante los primeros estadios vegetativos el modelo simuló una lenta expansión de la cobertura vegetal en las parcelas de calibración (lo cual coincide con lo reportado por Alvar-Beltrán *et al.* (2021) en Sahel, África). El comportamiento de la simulación de la cobertura del dosel en la validación también se asemeja a estudios realizados por Geerts *et al.* (2008), quienes estudiaron la fenología flexible del cultivo de quinua en la variedad Santa María en respuesta al estrés por sequía, y encontró que, bajo estrés hídrico grave antes de la antesis, el cultivo puede alargar el tiempo para alcanzar la floración y a la madurez fisiológica hasta en 30 días; mientras que frente a estrés hídrico durante la post antesis, la maduración se

puede acelerar. En esa misma línea, Alvar *et al.* (2019), reportó en un estudio realizado en Burkina Faso, que la quinua posee una alta eficiencia en el uso del agua en condiciones de estrés por sequía, y entre una sus respuestas fisiológicas se encuentra la senescencia acelerada de las hojas, lo cual le da a la planta una adaptabilidad óptima a ambientes secos. Estos periodos durante la fenología (momentos cercanos antes y después de floración) coincidirían con momentos donde no se realizó la aplicación del riego complementario en el presente estudio (Ver Tabla 7: Cronograma de labores realizadas en las parcelas de validación).

En relación a la biomasa seca área, la cual fue evaluada cada 30 días a lo largo del ciclo productivo, se encontró que el desempeño fue “aceptable o justo” con $\text{NRMSE} < 30\%$, $\text{EF} > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$ de acuerdo a los criterios de evaluación del modelo descrito en el ítem 3.15. Lo que significa que los valores de biomasa seca aérea simulados, presentan una aceptable correlación con los datos reales en todas las variedades. Alvar-Beltrán *et al.* (2021) en Sahel, África, encontró valores de $\text{NRMSE} = 14.8\%$ y $R^2 = 0.84$ para la validación de la biomasa seca área. Fajardo *et al.* (2016) reportó valores de desempeño de $\text{NRMSE} = 39.89\%$, $\text{EF} = -0.089$, $d = 0.819$ y $R^2 = 0.938$ para la validación de la biomasa seca área al final de la cosecha en diferentes niveles de estrés por fertilidad, bajo condiciones del Altiplano boliviano. Geerts *et al.* (2009) halló valores de $\text{RRMSE} = 25\%$, $\text{EF} = 0.82$ y $R^2 = 0.88$ para la biomasa seca área medida a lo largo del crecimiento del cultivo en el Altiplano Boliviano. Asimismo, estudios realizados por Van Gaelen *et al.* (2015) en Patacamaya, Bolivia indicó valores de $\text{RRMSE} = 18.3\%$ y 15.2% , y $R^2 = 0.91$ y 0.87 en parcelas conducidas bajo riego completo y en condiciones de secano respectivamente para biomasa seca área a la maduración. Los valores de indicadores estadísticos de eficiencia encontrados en este estudio se asemejan a los reportados por Geerts *et al.* (2009).

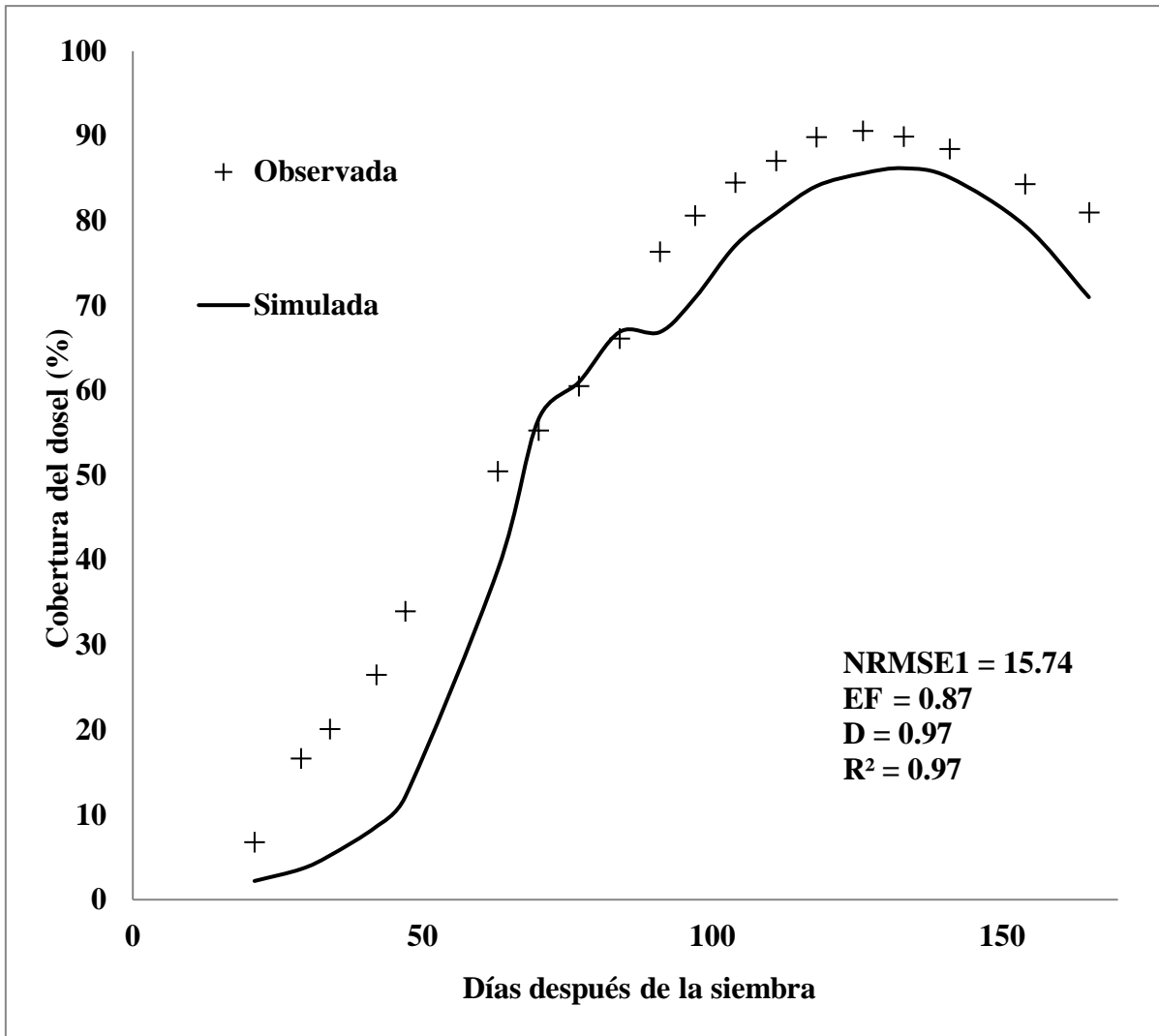


Figura 14: Cobertura del dosel (CC) simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la validación de la variedad Pasankalla

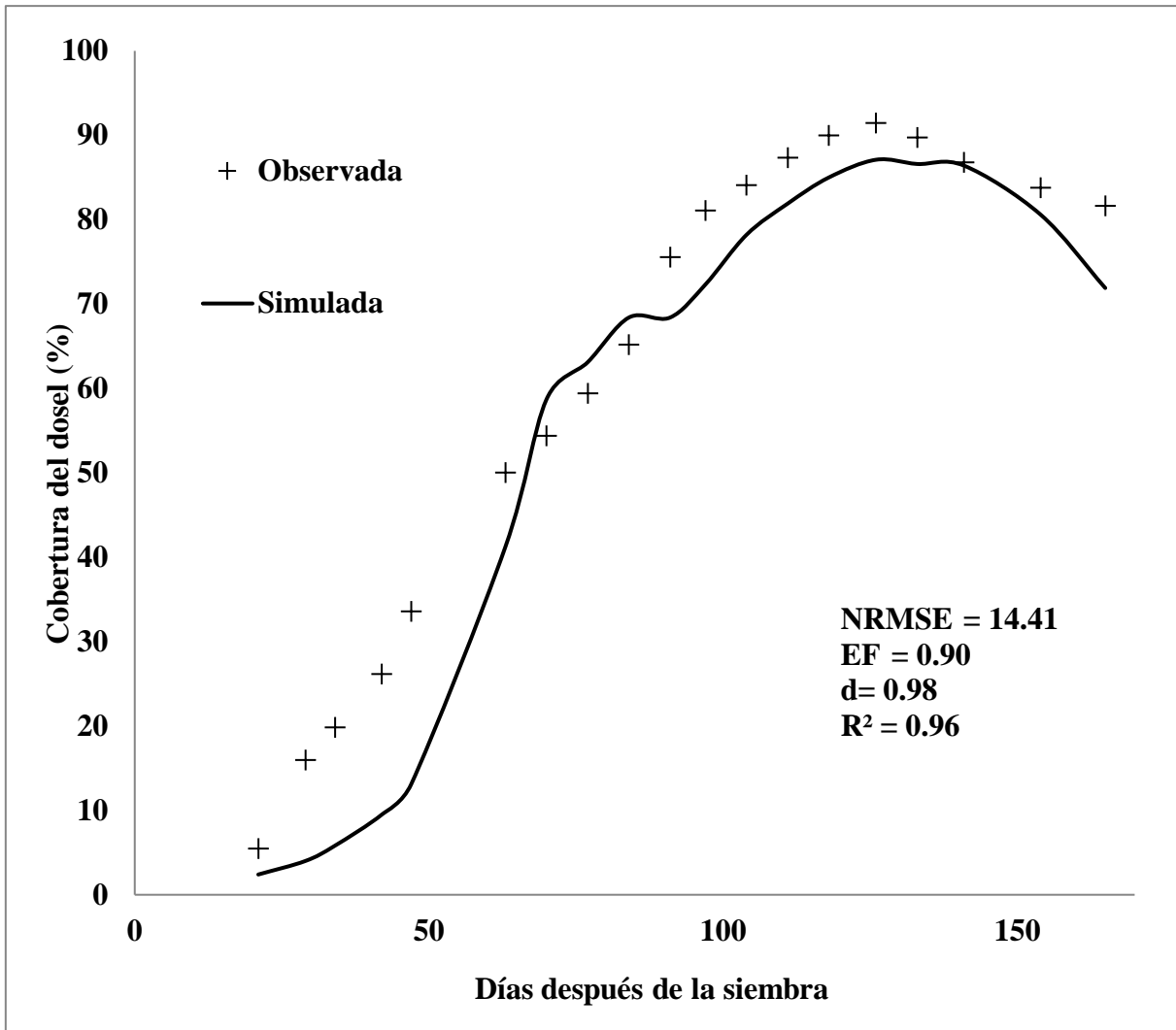


Figura 15: Cobertura del dosel (CC) simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la validación de la variedad Salcedo INIA

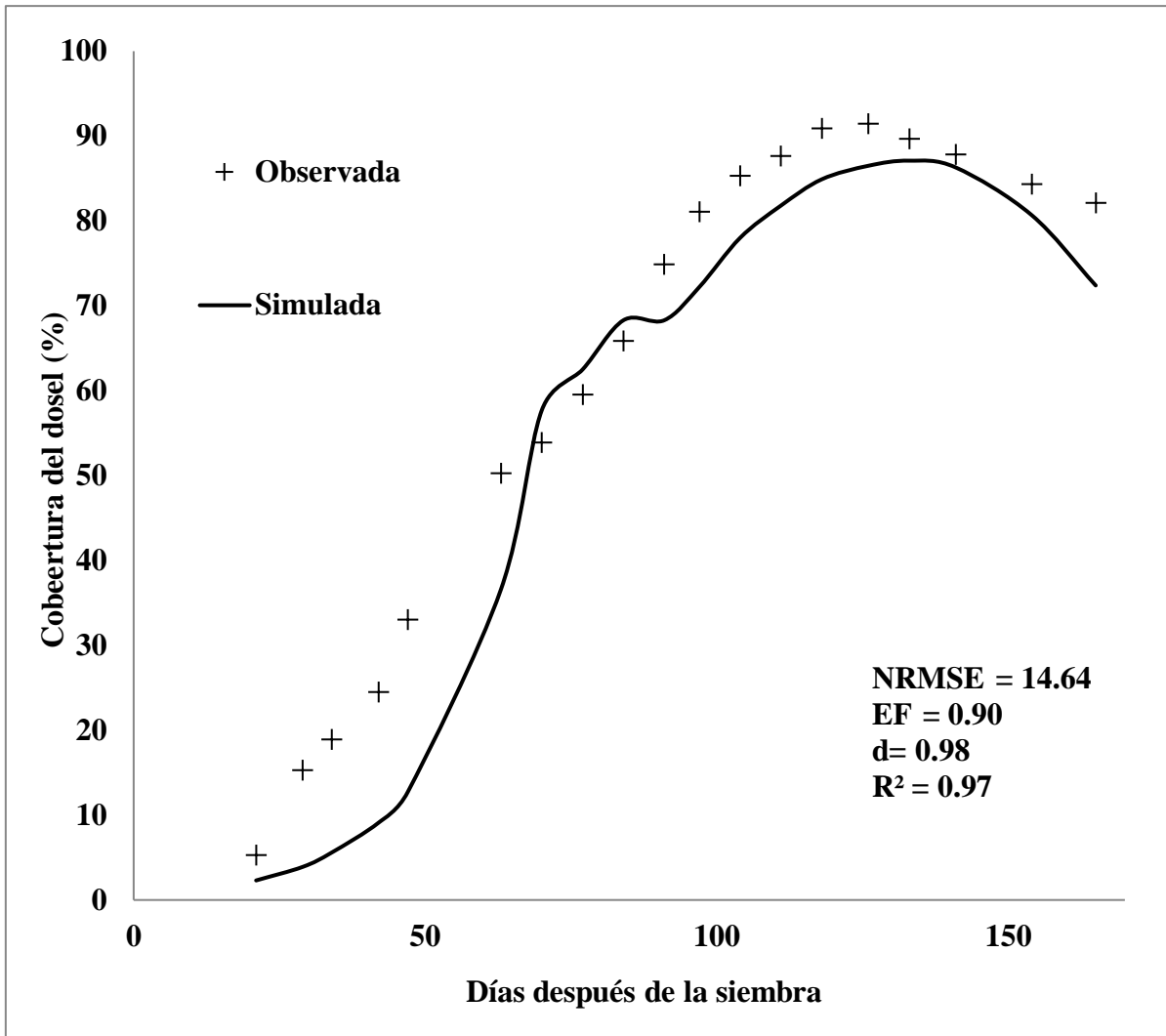


Figura 16: Cobertura del dosel (CC) simulada y observada a lo largo del ciclo del cultivo para la validación de la variedad Blanca de Juli

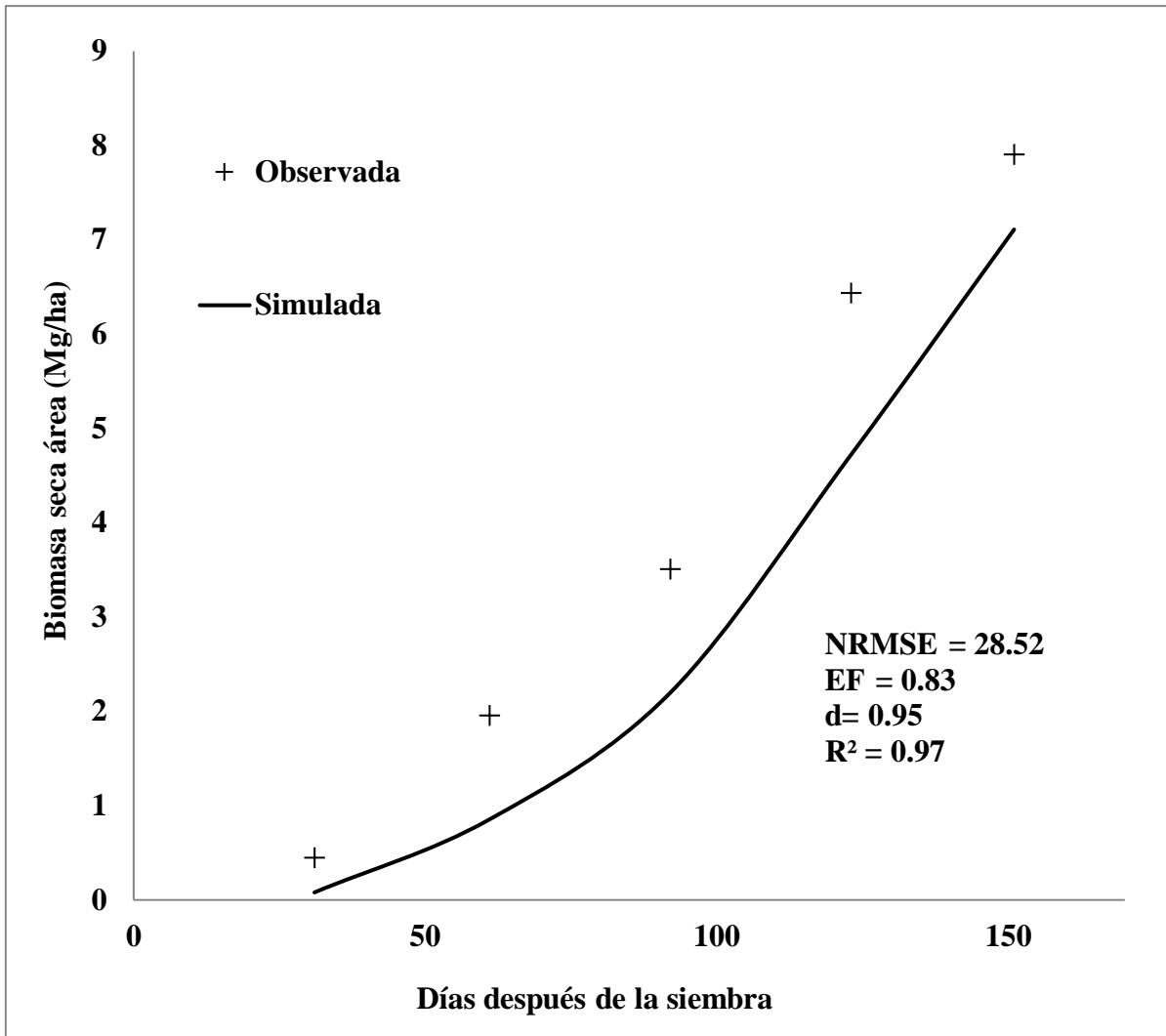


Figura 17: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la validación de la variedad Pasankalla

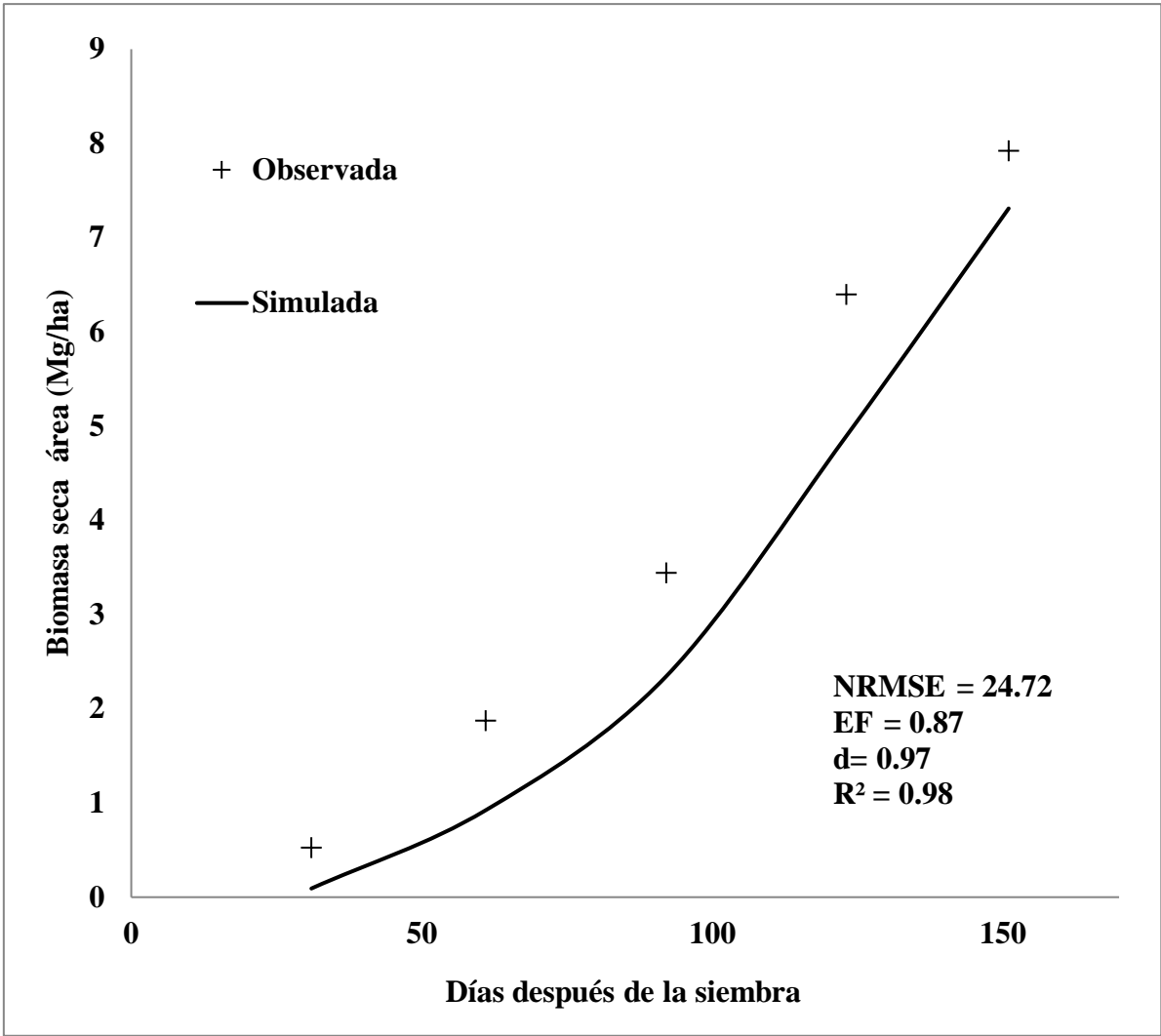


Figura 18: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la validación de la variedad Salcedo INIA

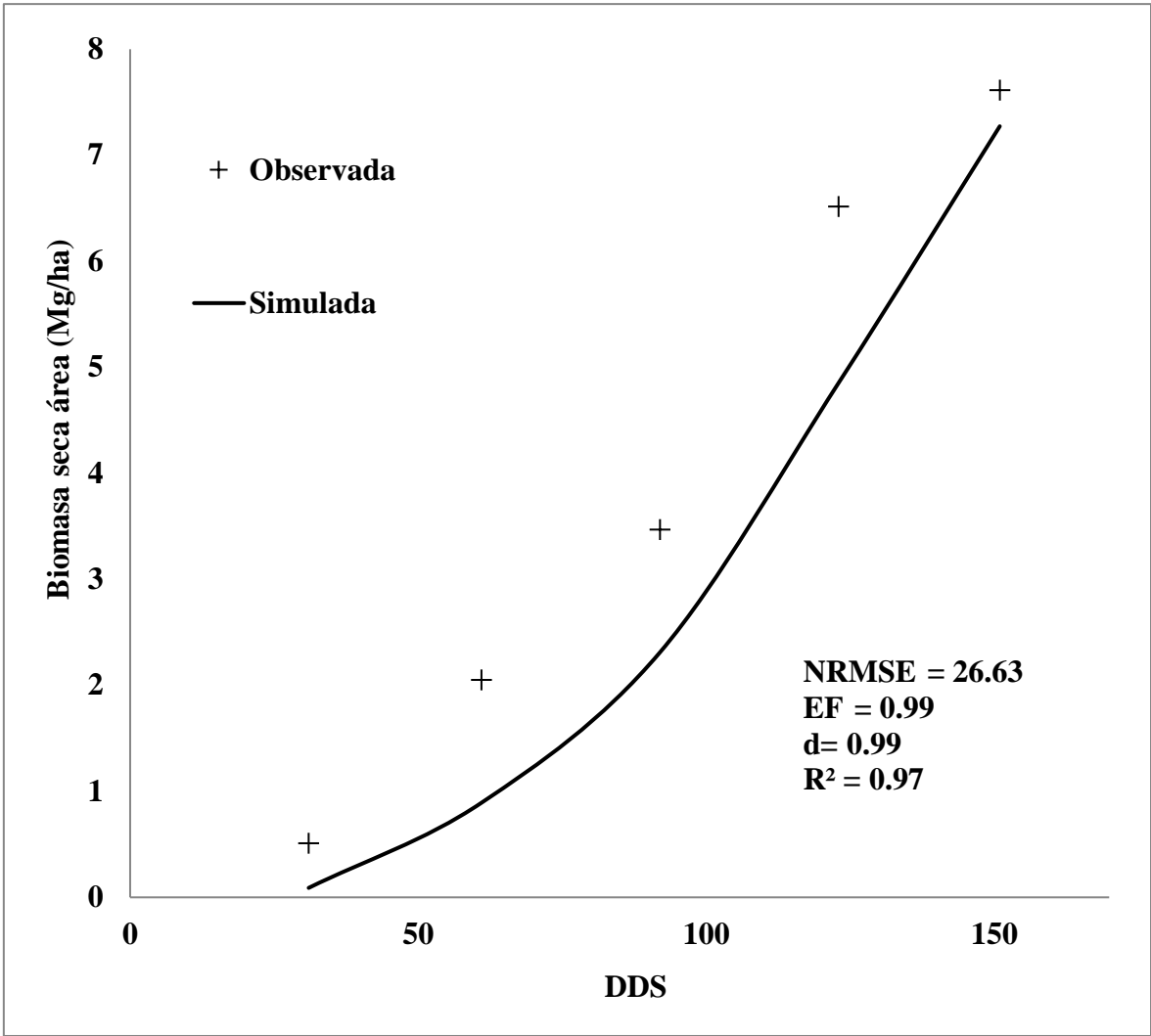


Figura 19: Biomasa seca área simulada y observada cada 30 días para la validación de la variedad Blanca de Juli

V. CONCLUSIONES

1. Se calibró el modelo AquaCrop bajo condiciones promedio de manejo en Taraco, Puno durante la campaña agrícola noviembre 2018 - abril 2019 para las variedades Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli del cultivo de quinua. Los parámetros que difirieron más en relación a sus valores predeterminados fueron los días a floración (D_{fl}), días a la senescencia (D_{sen}), días a la maduración pastosa (D_{mad}), la temperatura base (T_{base}), la profundidad máxima de enraizamiento (Z_x), el coeficiente de crecimiento del cultivo (CGC), la cobertura máxima del dosel (CC_x) y el coeficiente de disminución del dosel (CDC), obteniéndose un desempeño de “bueno” con $NRMSE < 20\%$, $EF > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$ para cobertura del dosel (CC), y un desempeño de “bueno” a “aceptable o justo” con $10\% < NRMSE < 30\%$, $EF > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$ para biomasa seca área (B).
2. Se validó el modelo AquaCrop con los datos obtenidos para las mismas tres variedades de quinua durante la calibración (siembra 7 de noviembre) y fueron probados en una época diferente de siembra (25 de octubre) bajo condiciones promedio de manejo en Taraco, Puno. Se alcanzó un desempeño de “bueno” con $NRMSE < 20\%$, $EF > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$ para cobertura del dosel (CC) y de “aceptable o justo” con $NRMSE < 30\%$, $EF > 0.75$, $d > 0.90$ y $R^2 > 0.5$ para la biomasa seca área (B); por lo tanto, el modelo AquaCrop es capaz de simular el comportamiento del cultivo de quinua bajo condiciones del Altiplano peruano.

VI. RECOMENDACIONES

Con el fin de ajustar una mejor calibración, se recomienda realizar la medición de la profundidad efectiva máxima de enraizamiento (Z_x) durante el desarrollo del cultivo de quinua.

Se recomienda la evaluación del modelo AquaCrop bajo condiciones óptimas de riego y fertilidad en el Altiplano peruano, con el objetivo de comparar los parámetros con los obtenidos en el presente estudio.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Abdalla, D., Jorge, A.-B., Abdou, G., Amidou, G., Louis, N., & Jacob, S. (2020). Effect of different planting techniques and sowing density rates on the development of quinoa.

African Journal of Agricultural Research, 16(9), 1325–1333.

<https://doi.org/10.5897/ajar2020.14904>

Adeboye, O. B., Schultz, B., Adeboye, A. P., Adekalu, K. O., & Osunbitan, J. A. (2021).

Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Information Processing in Agriculture*, 8(3), 419–436. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.10.002>

Alvar - Beltrán, J., Gobin, A., Orlandini, S., & Marta, A. D. (2021). Aquacrop

parametrisation for quinoa in arid environments. *Italian Journal of Agronomy*, 16(1), 1–10. <https://doi.org/10.4081/ija.2020.1749>

Alvar, J., Dao, A., Marta, A. D., Saturnin, C., Casini, P., Sanou, J., & Orlandini, S. (2019).

Effect of drought, nitrogen fertilization, temperature, and photoperiodicity on quinoa plant growth and development in the Sahel. *Agronomy*, 9(10).

<https://doi.org/10.3390/agronomy9100607>

Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R., & Pinedo, R. (2013). Variedades Comerciales De

Quinoa En El Perú. In *Catálogo De Variedades Comerciales De Quinoa En El Perú* (Vol. 1st). Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-as890s.pdf>

Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Plan De Prevención Ante La Presencia De*

Fenomenos (p. 135). Recuperado de <http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA PUBLICAR/ANA/Plan de prevencion ante la presencia de fenomenos naturales por inundaciones, deslizamientos, huaycos y sequias.pdf>

Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2003). Fundamentos de fisiología vegetal. In *McGrawHill*.

Benavides, A. (2002). *Ecofisiología y bioquímica del estrés en plantas* (Universidad

Autónoma Agraria Antonio Narro (ed.); Issue July).

Bertero, H. D., De La Vega, A. J., Correa, G., Jacobsen, S. E., & Mujica, A. (2004).

Genotype and genotype-by-environment interaction effects for grain yield and grain size of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as revealed by pattern analysis of international multi-environment trials. *Field Crops Research*, 89(2–3), 299–318. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.02.006>

Bhargava, A. & Srivastava, S. (2013). Quinoa botany, production and uses. CAB International, Oxfordshire

Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2006). Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 101(1), 104–116.

<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.10.001>

Bois, J. F., Winkel, T., Lhomme, J. P., Raffailac, J. P., & Rocheteau, A. (2006). Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy*, 25(4), 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.06.007>

Centro de Estudios y Prevención de Desastres. (2011). *Fenómenos Naturales Peligrosos*. Recuperado de <http://www.predes.org.pe/predes/sequias.htm>

Centro Internacional de la Papa. (2017). Image Canopy Software to analyze canopy cover images (versión 3.6). Lima, Perú. Recuperado de <https://cipotato.org/site/inrm/home/t-app/canopycover.rar>

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. (2017). *InfoStat versión 2017*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Recuperado de <http://www.infostat.com.ar>

Duca, M. (2015). Plant Physiology. In *Encyclopedia of Ecology*. Springer. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11130-3>

Fajardo, H., García, M., Raes, D., & H., V. G. (2016). Validación Del Modelo Aquacrop Para Diferentes Niveles De Fertilidad En El Cultivo De Quinoa En El Altiplano

Boliviano. *CINTEX*, 21, 31–52.

Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., & Mejía-Saénz, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo aquacrop. *Agrociencia*, 47(4), 347–359.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). ETo calculator versión 3.1. Land and Water Digital Media Series N°36. Roma, Italia. Recuperado de <http://www.fao.org/nr/water/Eto.html>

García-Parra, M. A., Roa-Acosta, D. F., Stechauner-Rohringer, R., García-Molano, F., Bazile, D., & Plazas-Leguizamón, N. (2020). Effect of temperature on the growth and development of quinoa plants (*Chenopodium quinoa* Willd.): A review on a global scale. *SYLWAN*, 164(May 2020), 411–433.

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J. A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., & Steduto, P. (2009). Simulating yield response of quinoa to water availability with aquacrop. *Agronomy Journal*, 101(3), 499–508. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0137s>

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Mendoza, J., and Huanca, R. (2008). Indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. *Field Crops Res.* 108:150–156.

Gómez, L., & Aguilar, E. (2016). Guía del cultivo de la quinua. In *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Universidad Nacional Agraria La Molina* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

González, J. A., Buedo, S. E., Bruno, M., & Prado, F. E. (2017). Quantifying Cardinal Temperatures in Quinoa (*Chenopodium quinoa*) Cultivars. *Lilloa*, 54(2), 179–194. <https://doi.org/10.30550/j.lil/2017.54.2/8>

Hadebe, S. T., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2017). Calibration and testing of AquaCrop for selected sorghum genotypes. *Water SA*, 43(2), 209–221.

<https://doi.org/10.4314/wsa.v43i2.05>

Hirich, A., Choukr-Allah, R., & Jacobsen, S. E. (2014). Quinoa in Morocco - Effect of sowing dates on development and yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(5), 371–377. <https://doi.org/10.1111/jac.12071>

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2015). *Modelos de simulación y herramientas de modelaje*.

Jacobsen, S., Monteros, Christiansen, C., Bravo, J., Corcuera, L., & Mujica, A. (2005). Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy*, 22(2), 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.01.003>

Jacobsen, S. (1998). Developmental stability of quinoa under European conditions. *Industrial Crops and Products*, 7(2–3), 169–174. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(97\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(97)00045-9)

Jacobsen, S. (1997). Adaptation of quinoa (*Chenopodium quinoa*) to Northern European agriculture: Studies on developmental pattern. *Euphytica*, 96(1), 41–48. <https://doi.org/10.1023/A:1002992718009>

Jacobsen, S., & Stølen, O. (1993). Quinoa - Morphology, phenology and prospects for its production as a new crop in Europe. *European Journal of Agronomy*, 2(1), 19–29. [https://doi.org/10.1016/s1161-0301\(14\)80148-2](https://doi.org/10.1016/s1161-0301(14)80148-2)

Jacovides, C., & Kontoyiannis, H. (1995). Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, 27(3-4), 365–371. doi:10.1016/0378-3774(95)01152-9

Jamieson, P, Porter, J., & Wilson, D. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27(4), 337–350. doi:10.1016/0378-4290(91)90040-3

Jensen, C. R., Jacobsen, S. E., Andersen, M. N., Núñez, N., Andersen, S. D., Rasmussen, L., & Mogensen, V. O. (2000). Leaf gas exchange water relation characteristics of

- field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during soil drying. *European Journal of Agronomy*, 13(1), 11–25. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00055-1)
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. 3era edición. Centro Español de Metrología. Recuperado de <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- Kanda, E. K., Senzanje, A., & Mabhaudhi, T. (2021). Calibration and validation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *Physics and Chemistry of the Earth*, 124, 102941. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102941>
- Koyro, H.-W., Ahmad, P., & Geissler, N. (2012). Environmental adaptations and stress tolerance of plants in the era of climate change. *Environmental Adaptations and Stress Tolerance of Plants in the Era of Climate Change*, 1–515. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0815-4>
- Madhava, K., Raghavendra, A., & Janardhan, R. (2006). *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*. Springer.
- Mamedi, A., Afshari, R. T., & Oveisi, M. (2017). Cardinal temperatures for seed germination of three Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 2017, 89–100. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.206204.654106>
- Mendoza, M. (Universidad de C. (2012). *EFFECTO DEL FOTOPERÍODO SOBRE LA DURACIÓN DE LA FASE VEGETATIVA EN TRES ACCESIONES CHILENAS DE QUÍNOA (Chenopodium quinoa willd.)*.
- Mhizha, T., Geerts, S., Vanuytrecht, E., Makarau, A., & Raes, D. (2014). sowing guidelines for rainfed maize in Zimbabwe. *Water SA*, 40(2), 233–244.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2018). *Nota Técnica de Granos Andinos* (p. 9). Recuperado de <http://minagri.gob.pe/portal/analisis-economico/analisis-2018?download=13278:nota-tecnica-de-granos-andinos>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T.

- L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agriculture and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.1234/590>
- Mujica, A. (2006). *MANUAL PARA CARACTERIZACIÓN IN SITU DE CULTIVOS NATIVOS Conceptos y Procedimientos* (pp. 90–94). Instituto Nacional de Investigación y Extensión Agraria-INIEA.
- Mujica, A., Jacobsen, S.E., Izquierdo, J., Marathe, J. (2001). Resultados de la Prueba Americana y Europea de la Quinoa. FAO, UNA-Puno, CIP, 51 pp. Recuperado de <http://www.rlc.fao.org/prior/segalim/prodalim/prodveg/cdrom/contenido/libro06/home6.htm>
- Mujica, A. (1997). Cultivo de Quinoa. INIA. Serie Manual RI, No. 1-97. Instituto Nacional de Investigación Agraria, Dirección General de Investigación Agraria. Lima, Perú. 130 p.
- Mujica, A. (1992). Cultivos marginados: otra perspectiva de 1492. In J. E. Hernández Bermejo & J. León (Eds.), *Producción y protección vegetal N°26 FAO* (Vol. 26).
- Mujica, A. & Canahua, A. (1989). Fases fenológicas del cultivo de la Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Curso Taller Fenología de Cultivos Andinos y Usos de Información Agro Meteorológica Perú, pp. 23-27.
- Murphy, K., & Matanguihan, J. (2015). Quinoa Sustainable production, variety improvement, and nutritive value in agroecological systems. In *Wiles Balckwell*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Oelke, E. A., Putnam, D.H., Teynor, D.M. y Oplinger, E.S. (1992). Alternative field crops manual-quinoa. EE.UU., Universidad de Purdue. Recuperado de <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/afcm/drypea.html>
- Oficina de Gestión de la Información y Estadística. (2016). *Carpeta Georeferencial Puno Perú* (pp. 1–18).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2017). *Sembrar quinoa orgánica para reducir la pobreza en los Andes*. Recuperado de <http://www.fao.org/peru/noticias/detail-events/en/c/472631/>

Pan Africa Bean Research Alliance (PABRA). (2021). Improving bean production and marketing in Africa (IBPMA) April 2020 - March 2021 Report. 25 p.

Presidencia del Consejo de Ministros. (2014). *Plan Multisectorial Ante Heladas Y Friaaje 2014* (p. 87). Recuperado de <http://www.pcm.gob.pe/wp-content/uploads/2014/05/PLAN-MULTISECTORIAL-ANTE-HELADAS-y-FRIAJE-2014.pdf>

Production Systems and the Environment (PSE); International Potato Center (CIP). 2013. Protocol for designing and conducting potato field experiments for modeling purposes. Lima (Peru). ISBN 978-92-9060-430-3. 16 p.

Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., Iafelice, G., Marconi, E., & D'Andria, R. (2012). Yield and Quality Characteristics of Quinoa Grown in Open Field Under Different Saline and Non-Saline Irrigation Regimes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198(4), 254–263. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2012.00509.x>

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2018). 2018_AquaCrop_Annexes. In *Fao* (Issue May, p. 87). Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-br244e.pdf>

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2018). Reference Manual AquaCrop Version 6.1. FAO. Rome. Recuperado de <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>

Ran, H., Kang, S., Li, F., Du, T., Tong, L., Li, S., Ding, R., & Zhang, X. (2018). Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 203(March), 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.030>

Risi, J., & Galwey, N. (1991). Effects of sowing date and sowing rate on plant development and grain yield of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in a temperate environment. *The Journal of Agricultural Science*, 117(3), 325–332. <https://doi.org/10.1017/S002185960006706X>

Rosa, M., Hilal, M., González, J. A., & Prado, F. E. (2009). Low-temperature effect on enzyme activities involved in sucrose–starch partitioning in salt-stressed and salt-acclimated cotyledons of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seedlings. *Plant*

- Physiology and Biochemistry, 47(4), 300–307. doi:10.1016/j.plaphy.2008.12.001
- Rosa, M., Hilal, M., González, J. A., & Prado, F. E. (2004). Changes in soluble carbohydrates and related enzymes induced by low temperature during early developmental stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) seedlings. *Journal of Plant Physiology*, 161(6), 683–689. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01257>
- Sadras, V., & Calderini, D. (2021). Crop Physiology Case Histories for Major Crops. In *Nuevos sistemas de comunicación e información*.
- Sajjad, A., Munir, H., Ehsanullah, Anjum, S. A., Tanveer, M., & Rehman, A. (2014). Growth and development of *Chenopodium quinoa* genotypes at different sowing dates. *Journal of Agricultural Research (Lahore)*, 52(4), 535–546.
- Salcedo, S., Santivañez, T., Bazile, D., Bertero, D., & Nieto, C. (2014). STATE OF THE ART REPORT ON QUINOA around the world in 2013. In *State of the art report on quinoa around the world in 2013*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/i4042e/i4042e.pdf>
- Salisbury, F. & Ross, C. (2000). Fisiología de las Plantas. Tomson Editors Spain. Madrid-España.
- Sosa-Zuniga, V., Brito, V., Fuentes, F., & Steinfort, U. (2017). Phenological growth stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on the BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 171(1), 117–124. <https://doi.org/10.1111/aab.12358>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. In *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* (Vol. 66). <https://doi.org/978-92-5-308564-4>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology* (Third edit). Universitat Jaume I.
- Talebnejad, R., & Sepaskhah, A. R. (2015). Effect of deficit irrigation and different saline groundwater depths on yield and water productivity of quinoa. *Agricultural Water Management*, 159, 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.005>
- Tapia, M., Gandarillas, H., Alandia, S., Cardozo, A., Ortiz, R., Otazu, V., Rea, J., Salas, B., & Zanabria, E. (1979). Quinoa y Kañiwa cultivos andinos. In *IICA*. <https://idl-bnc->

idrc.dspacedirect.org/handle/10625/4118

- Tornés, N., Brown, O., Masjuan, Y., & Guerrero, A. (2016). Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation Evaluación del modelo AquaCrop en la simulación del crecimiento del cultivo del frijol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 23–30. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30090.06080>
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>
- Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J., & Raes, D. (2015). A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: Evaluation of the AquaCrop procedure. *Journal of Agricultural Science*, 153(7), 1218–1233. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000872>
- Veas, E., & Cortés, H. (2016). Manual del cultivo de la Quinoa. Cultivo ancestral como una alternativa eficiente para la adaptación de la agricultura al cambio climático. In *Ceaza; Inia* (Primera ed).
- Wadsworth, J. (1997). Análisis de sistemas de producción animal: Las bases conceptuales. In *Aditivos nutrición y promotores de crecimiento alimentación animal* (Estudio FA).
- Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Transducer Performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 63. [https://doi.org/https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1982BAMS...63.1309W/doi:10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1982BAMS...63.1309W/doi:10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2)

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: LISTA DE ABREVIATURAS

- B** : Biomasa seca área del cultivo ($Mg \cdot ha^{-1}$. o kg/m^2)
- CC** : Cobertura del dosel verde (porcentaje o fracción)
- CC₀** : Cobertura inicial del dosel al 90% de emergencia (porcentaje o fracción)
- cc₀** : Tamaño del dosel de la plántula promedio al 90 % de emergencia (cm^2)
- CGC** : Coeficiente de crecimiento del dosel (porcentaje o fracción de crecimiento del dosel por unidad de tiempo)
- CC_x** : Cobertura máxima del dosel (porcentaje o fracción)
- CDC** : Coeficiente de disminución del dosel (porcentaje o fracción de disminución del dosel por unidad de tiempo)
- FC** : Capacidad de campo, refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado
- GDD** : Grados días de crecimiento ($^{\circ}C d$), refiere a las unidades térmicas de la suma de calor que la planta acumula en cada fase de desarrollo
- K_{c,Trx}**: Coeficiente de cultivo cuando el dosel cubre completamente el terreno
- PWP**: Punto de marchitez permanente, refiere al contenido de agua de un suelo que ha perdido toda su agua debido al cultivo, y el agua que permanece en el suelo no está disponible para el mismo
- T_{base}**: Temperatura base, refiere a la temperatura por debajo de la cual el desarrollo del cultivo no progresa ($^{\circ}C$)
- T_{upper}**: Temperatura superior, refiere a la temperatura por encima de la cual el desarrollo del cultivo no incrementa con un aumento de la temperatura ($^{\circ}C$)
- Tr** : Transpiración del cultivo (mm por unidad de tiempo)

Z_e : Profundidad efectiva enraizamiento del cultivo (m)
 Z_x : Profundidad efectiva máxima de enraizamiento del cultivo (m)
 Z_n : Profundidad efectiva mínima de enraizamiento del cultivo (m)
 $P_{exp,lower}$: Umbral superior de agotamiento del agua del suelo que limita la expansión del dosel
 $P_{exp,upper}$: Umbral inferior de agotamiento del agua del suelo que limita la expansión del dosel
 P_{sto} : Umbral superior de agotamiento del agua del suelo que limita la conductancia estomática
 P_{sen} : Umbral superior de agotamiento del agua del suelo que limita la senescencia del dosel
 P_{sen} : Umbral superior de agotamiento del agua del suelo que limita la polinización
 D_{em} : Días calendario desde la siembra a la emergencia
 D_{fl} : Días calendario desde la siembra a la emergencia
 D_{fl} : Duración de la etapa de floración
 D_{sen} : Días calendario desde la siembra hasta la senescencia (maduración pastosa)
 D_{mad} : Días calendario desde la siembra hasta madurez (duración del ciclo del cultivo)
 WP : Productividad del agua para la biomasa (toneladas de biomasa por ha y por mm de agua transpirada o kg de biomasa por m³ de agua transpirada)
 WP^* : Productividad del agua normalizada por ET_0 y concentración de CO_2 en el aire (Mg·ha⁻¹ o kg/m²)

ANEXO 2: PRUEBA DE KRUSKAL WALLIS DE DÍAS A LA EMERGENCIA EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN

Variedad	Medias	D.E.	Medianas	Promedio rangos	Grados de libertad	H	p
Pasankalla	10.67	1.15	10	5	2	0	>0.9999
Salcedo							
INIA	10.67	1.15	10	5			
Blanca de Juli	10.67	1.15	10	5			

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 3: PRUEBA DE KRUSKAL WALLIS DE DÍAS A LA EMERGENCIA EN PARCELAS DE VALIDACIÓN

Variedad	Medias	D.E.	Medianas	Promedio rangos	Grados de libertad	H	p
Pasankalla	15.33	2.31	14	5.17	2	0.07	>0.9999
Salcedo							
INIA	15.33	2.31	14	5.17			
Blanca de Juli	14.67	1.15	14	4.67			

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 4: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA FLORACIÓN EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	4.22	2	2.11	1.19	0.39	
Bloque	2.89	2	1.44	0.81	0.51	
Error	7.11	4	1.78			
Total	14.22	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 5: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA FLORACIÓN EN PARCELAS DE VALIDACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	2.67	2	1.33	0.5	0.64	
Bloque	16.67	2	8.33	3.13	0.1523	
Error	10.67	4	2.67			
Total	30	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 6: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA FORMACIÓN DE GRANO PASTOSO EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	1.56	2	0.78	0.14	0.87	
Bloque	5.56	2	2.78	0.51	0.63	
Error	21.78	4	5.44			
Total	28.89	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 7: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA FORMACIÓN DE GRANO PASTOSO EN PARCELAS DE VALIDACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	10.89	2.0	5.44	2.39	0.21	
Bloque	3.56	2.0	1.78	0.78	0.52	
Error	9.11	4.0	2.28			
Total	23.56	8.0				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 8: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA MADURACIÓN EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	8.22	2	4.11	3.22	0.15	
Bloque	2.89	2	1.44	1.13	0.41	
Error	5.11	4	1.28			
Total	16.22	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 9: ANÁLISIS DE VARIANZA DE DÍAS A LA MADURACIÓN EN PARCELAS DE VALIDACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	44.22	2	22.11	15.31	0.01	*
Bloque	2.89	2	1.44	1.00	0.44	
Error	5.78	4	1.44			
Total	52.89	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 10: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) MEDIDA A LOS 30 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.02	2	0.01	1.75	0.2841	
Bloque	0.02	2	0.01	1.74	0.2867	
Error	0.03	4	0.01			
Total	0.07	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

**ANEXO 11: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹)
MEDIDA A LOS 30 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN**

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.01	2	0.01	1.23	0.61	
Bloque	0.04	2	0.02	0.55	0.26	
Error	0.04	4	0.01	1.90		
Total	0.08	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

**ANEXO 12: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹)
MEDIDA A LOS 60 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN**

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.07	2	0.04	1.88	0.27	
Bloque	1.50E-03	2	7.60E-04	0.04	0.96	
Error	0.08	4	0.02			
Total	0.15	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

**ANEXO 13: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹)
MEDIDA A LOS 60 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN**

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.05	2.00	0.02	0.29	0.76	
Bloque	0.22	2.00	0.11	1.29	0.37	
Error	0.34	4.00	0.08			
Total	0.60	8.00				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 14: PRUEBA DE KRUSKAL WALLIS DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹) MEDIDA A LOS 90 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN

Variedad	Medias	D.E.	Medianas	Promedio rangos	Grados de libertad	H	p
Pasankalla	4.06	0.18	4.04	3.17	2.00	2.16	0.37
Salcedo							
INIA	3.77	0.63	3.97	6.33			
Blanca de Juli	3.60	0.47	3.77	5.50			

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 15: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹) MEDIDA A LOS 90 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.01	2	0.00	0.05	0.95	
Bloque	0.57	2	0.28	4.91	0.08	
Error	0.23	4	0.06			
Total	0.80	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 16: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹) MEDIDA A LOS 120 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.34	2	0.17	1.14	0.41	
Bloque	0.40	2	0.20	1.32	0.36	
Error	0.60	4	0.15			
Total	1.35	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

**ANEXO 17: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹)
MEDIDA A LOS 120 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN**

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.02	2	0.01	0.13	0.89	
Bloque	0.16	2	0.08	0.93	0.47	
Error	0.35	4	0.09			
Total	0.53	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

**ANEXO 18: PRUEBA DE KRUSKAL WALLIS DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹)
MEDIDA A LOS 150 DÍAS EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN**

Variedad	Medias	D.E.	Medianas	Promedio rangos	Grados de libertad	H	p
Pasankalla	7.37	0.53	7.08	3.67	2	1.42	0.54
Salcedo INIA	7.55	0.47	7.43	6.33			
Blanca de Juli	7.26	0.08	7.24	5			

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

**ANEXO 19: ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹)
MEDIDA A LOS 150 DÍAS EN PARCELAS DE VALIDACIÓN**

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.18	2.00	0.09	0.48	0.65	
Bloque	0.32	2.00	0.16	0.86	0.49	
Error	0.74	4.00	0.19			
Total	1.24	8.00				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 20: PRUEBA DE VARIANZA DEL RENDIMIENTO (Mg.ha⁻¹) EN PARCELAS DE CALIBRACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.84	2	0.42	51.96	1.40E-03	*
Bloque	0.14	2	0.07	8.53	0.04	
Error	0.03	4	0.01			
Total	1.01	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 21: PRUEBA DE VARIANZA DEL RENDIMIENTO (Mg.ha⁻¹) EN PARCELAS DE VALIDACIÓN

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F	P-value	Sig.
Variedad	0.16	2	0.08	5.87	0.06	
Bloque	0.02	2	0.01	0.91	0.47	
Error	0.05	4	0.01			
Total	0.24	8				

*Significancia a nivel de $\alpha=0.05$

ANEXO 22: EVALUACIONES FENOLÓGICAS (días) EN LAS PARCELAS DE CALIBRACIÓN

Variedad	Bloque	Emergencia	Floración	Grano pastoso	Maduración
Salcedo INIA	B1	10	96	142	170
Pasankalla	B1	10	95	144	172
Blanca de Juli	B1	10	97	143	173
Blanca de Juli	B2	10	96	142	174
Salcedo INIA	B2	10	98	143	170
Pasankalla	B2	10	95	139	172
Pasankalla	B3	12	97	144	170
Blanca de Juli	B3	12	99	139	171
Salcedo INIA	B3	12	96	141	171

B es el bloque

ANEXO 23: EVALUACIONES FENOLÓGICAS (días) EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN

Variedad	Bloque	Emergencia	Floración	Grano pastoso	Maduración
Salcedo INIA	B1	14	86	139	175
Blanca de Juli	B1	14	86	138	173
Pasankalla	B1	14	90	139	170
Blanca de Juli	B2	14	90	139	175
Pasankalla	B2	14	89	135	169
Salcedo INIA	B2	14	88	138	173
Pasankalla	B3	18	90	136	168
Salcedo INIA	B3	16	91	140	172
Blanca de Juli	B3	18	91	140	174

B es el bloque

ANEXO 24: EVALUACIONES DE BIOMASA SECA AÉREA ($Mg \cdot ha^{-1}$) EN LAS PARCELAS DE CALIBRACIÓN

Variedad	Bloque	DDS				
		30	60	90	120	150
Blanca de Juli	B1	0.38	2.01	3.77	6.61	7.24
Salcedo INIA	B1	0.28	1.95	3.07	5.88	8.06
Pasankalla	B1	0.42	2.03	4.04	6.68	7.98
Salcedo INIA	B2	0.51	1.71	3.97	6.23	7.43
Pasankalla	B2	0.49	2.13	4.25	6.34	7.06
Blanca de Juli	B2	0.45	2.14	3.07	5.53	7.36
Blanca de Juli	B3	0.57	1.93	3.89	6.71	7.08
Salcedo INIA	B3	0.31	2.14	3.96	6.69	7.19
Pasankalla	B3	0.38	1.99	4.27	6.21	7.14

B es el bloque

ANEXO 25: EVALUACIONES DE BIOMASA SECA AÉREA (Mg.ha⁻¹) EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN

Variedad	Bloque	DDS				
		30	60	90	120	150
Pasankalla	B1	0.47	2.03	4.01	6.58	8.27
Salcedo INIA	B1	0.64	2.28	3.89	6.44	8.44
Blanca de Juli	B1	0.41	1.83	3.51	6.87	7.51
Salcedo INIA	B2	0.40	1.56	3.24	6.18	7.72
Blanca de Juli	B2	0.50	1.88	3.57	6.38	7.39
Pasankalla	B2	0.34	1.79	3.48	6.69	8.09
Blanca de Juli	B3	0.63	2.46	3.33	6.29	7.95
Pasankalla	B3	0.53	2.04	3.04	6.05	7.36
Salcedo INIA	B3	0.54	1.78	3.21	6.58	7.60

B es el bloque

ANEXO 26: RENDIMIENTO EVALUADO (Mg.ha⁻¹) EN LAS PARCELAS DE CALIBRACIÓN

Variedad	Bloque	Rendimiento
Salcedo INIA	B1	1.15
Pasankalla	B1	2.03
Blanca de Juli	B1	1.61
Blanca de Juli	B2	1.41
Salcedo INIA	B2	0.89
Pasankalla	B2	1.61
Pasankalla	B3	1.61
Blanca de Juli	B3	1.50
Salcedo INIA	B3	1.01

B es el bloque

ANEXO 27: RENDIMIENTO EVALUADO (Mg.ha⁻¹) EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN

Variedad	Bloque	Rendimiento
Salcedo INIA	B1	1.19
Blanca de Juli	B1	1.58
Pasankalla	B1	1.01
Blanca de Juli	B2	1.38
Pasankalla	B2	1.15
Salcedo INIA	B2	1.19
Pasankalla	B3	1.12
Salcedo INIA	B3	1.06
Blanca de Juli	B3	1.24

B es el bloque

ANEXO 28: COBERTURA DEL DOSEL (%) MEDIDA EN LAS PARCELAS DE CALIBRACIÓN

DDS	Pasankalla				Salcedo INIA				Blanca de Juli			
	\bar{x}	Mínimo	Máximo	σ	\bar{x}	Mínimo	Máximo	σ	\bar{x}	Mínimo	Máximo	σ
29	4.75	4.51	4.96	0.23	3.54	2.89	3.96	0.57	4.05	3.47	5.12	0.93
34	8.97	8.15	9.45	0.72	7.79	6.33	9.88	1.86	9.25	7.15	12.06	2.53
50	15.24	14.87	15.42	0.32	14.79	13.29	16.26	1.49	14.74	13.50	16.48	1.55
57	18.84	18.36	19.68	0.73	17.36	14.30	19.04	2.65	20.65	17.72	23.09	2.72
64	25.48	24.97	26.35	0.76	24.72	22.22	27.79	2.83	24.25	22.54	26.42	1.98
71	36.52	31.73	39.47	4.19	32.69	28.22	38.46	5.24	33.78	30.56	38.83	4.43
78	45.07	44.66	45.63	0.51	45.54	39.52	49.59	5.31	41.68	39.66	43.26	1.84
84	55.05	51.49	57.98	3.29	55.89	53.37	59.16	2.97	54.43	52.55	57.47	2.66
91	65.73	65.24	66.11	0.44	63.63	62.31	65.35	1.56	63.76	62.31	65.48	1.60
98	77.60	72.69	80.88	4.34	76.50	74.67	78.44	1.89	78.84	74.48	81.70	3.84
105	83.13	81.57	84.44	1.45	85.28	82.98	86.64	2.01	82.30	80.73	84.40	1.89
113	88.07	87.61	88.65	0.53	87.13	85.73	89.36	1.95	88.67	86.43	89.96	1.95
120	88.21	86.43	90.58	2.14	89.29	87.96	90.26	1.19	88.96	86.77	90.75	2.02
128	89.62	89.15	89.96	0.42	88.87	86.13	90.86	2.46	88.21	86.31	90.06	1.88
141	89.62	89.15	89.96	0.42	87.37	86.13	89.63	1.96	87.70	86.31	88.52	1.21
152	86.70	86.24	87.26	0.52	85.98	85.44	86.55	0.55	86.60	85.12	88.52	1.74
163	82.08	81.26	82.54	0.71	82.77	82.15	83.54	0.71	83.37	82.15	84.56	1.21

ANEXO 29: COBERTURA DEL DOSEL (%) MEDIDA EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN

DDS	Pasankalla				Salcedo INIA				Blanca de Juli			
	\bar{x}	Mínimo	Máximo	σ	\bar{x}	Mínimo	Máximo	σ	\bar{x}	Mínimo	Máximo	σ
21	6.80	6.34	7.21	0.44	5.53	4.28	6.72	1.22	5.29	4.92	5.84	0.48
29	16.67	15.90	17.47	0.79	15.98	15.03	17.66	1.46	15.31	14.71	16.22	0.80
34	20.15	19.48	20.67	0.61	19.85	18.22	21.45	1.62	18.97	18.55	19.61	0.57
42	26.55	24.82	27.43	1.50	26.20	24.23	28.66	2.26	24.50	23.51	25.11	0.87
47	34.04	32.45	35.71	1.63	33.64	32.45	35.44	2.60	33.07	32.20	34.28	1.08
63	50.51	49.75	51.45	0.86	50.08	49.75	51.63	1.70	50.29	49.61	51.48	1.03
70	55.35	54.72	56.36	0.89	54.39	59.18	56.30	1.82	53.91	52.06	55.89	1.92
77	60.54	59.18	61.22	1.18	59.43	58.13	60.09	1.12	59.59	57.44	62.34	2.50
84	66.15	64.87	67.25	1.20	65.24	63.92	66.96	1.56	65.88	64.11	68.32	2.18
91	76.38	72.11	78.62	3.70	75.61	73.15	79.33	3.28	74.93	74.15	75.41	0.68
97	80.67	80.09	81.44	0.70	81.12	79.48	83.64	2.22	81.10	79.14	82.65	1.79
104	84.55	83.06	86.30	1.64	84.12	82.11	85.22	1.75	85.33	82.59	86.95	2.38
111	87.09	85.12	88.63	1.79	87.36	85.36	88.59	1.75	87.70	86.27	89.41	1.59
118	89.92	88.18	92.45	2.24	89.99	89.44	90.26	0.47	90.95	90.15	91.36	0.69
126	90.63	90.26	91.26	0.55	91.47	91.37	91.55	0.09	91.51	89.48	92.56	1.76
133	89.98	89.45	90.27	0.45	89.80	89.41	90.36	0.50	89.70	88.43	90.54	1.12
141	88.49	87.45	89.74	1.16	86.81	85.15	89.15	2.09	87.85	87.15	89.24	1.20
154	84.35	81.26	86.51	2.74	83.81	82.61	84.56	1.05	84.40	84.11	84.96	0.49
165	81.01	80.11	81.69	0.81	81.68	81.25	82.33	0.58	82.19	80.36	85.66	3.01

**ANEXO 30: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA VARIEDAD PASANKALLA (a),
BLANCA DE JULI (b), SALCEDO INIA (c) DE LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN
EN DESARROLLO DE LA INFLORESCENCIA O PANOJA Y UBICACIÓN DE LA
ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA EN TARACO (d)**



