

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMÍA



**“ANÁLISIS PRELIMINAR PARA EL USO DEL MODELO AQUACROP
EN TRES VARIEDADES DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) EN
EL VALLE DEL MANTARO.”**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

LUIS LEONARDO VALDERRAMA VÁSQUEZ

Lima – Perú

2020

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

**“ANÁLISIS PRELIMINAR PARA EL USO DEL MODELO AQUACROP EN TRES
VARIEDADES DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) EN EL VALLE DEL
MANTARO.”**

Presentada por:

LUIS LEONARDO VALDERRAMA VÁSQUEZ

Tesis para optar por el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

Dr. Sady Javier García Bendezú

PRESIDENTE

Ing. Mg. Sc. Hugo Ramos Inca Roca

ASESOR

Dr. Percy Zorogastúa Cruz

MIEMBRO

Dr. Jorge Jiménez Dávalos

MIEMBRO

Lima – Perú

2020

DEDICATORIA

A mis padres, por su consejo, paciencia y amor incondicional que, desde siempre y en los momentos más difíciles, me ayudan a ser mejor persona y profesional.

A mis hermanos, por ser un soporte y ejemplo, marcando siempre un camino a seguir.

A O.C., por el respaldo y la confianza depositadas en mi persona, que me hicieron crecer con mayor capacidad, una nueva visión y como un mejor profesional.

A B.N. y Ricardito, los recordaré con cariño hoy y por siempre.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y a la Facultad de Agronomía, por haberme permitido formarme en ella y a las personas que fueron parte de este proceso.

Al Instituto de Investigación Científica (IDIC) de la Universidad de Lima y en particular al Dr. Héctor Bedón, por el respaldo que desde un inicio hizo posible esta investigación.

Al proyecto N° 006-2016-INIA-PNIA/UPMSI/IE “QUINUA SMARTAPP: Prototipo de plataforma rural inteligente, en tiempo real, para incrementar la productividad en la cadena de valor de quinua orgánica (*Chenopodium quinoa* Willd.)” por el financiamiento de la investigación.

Al personal del Instituto Regional de Desarrollo (IRD) Sierra y al Ing. Mg. Sc. Rolando Egúsquiza Bayona, quienes brindaron las facilidades para el desarrollo del presente trabajo durante la fase experimental de la investigación.

A la Oficina de Gestión de la Investigación (OGI), por promover el nuevo conocimiento y facilitar herramientas para llevar a cabo esta investigación.

Al Dr. Jorge Jiménez Dávalos y a mi asesor Mg. Sc. Hugo Ramos, por permitirme ser parte de este proyecto; por la confianza y el apoyo incondicional, gracias a los cuales se logró llevar a cabo esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1	El cultivo de quinua.....	3
2.1.1	Descripción botánica	3
2.1.2	Taxonomía	4
2.1.3	Nutrición mineral y fertilización	4
2.1.4	Mecanismo fotosintético de la quinua (C ₃)	5
2.2	Modelo agrometeorológico AquaCrop.....	5
2.2.1	Descripción del modelo	6
2.2.2	Requerimientos de la modelación.....	10
2.3	Cambio climático	13
2.3.1	Pronostico de escenarios climáticos para el Perú	13
2.4	Uso de vehículos aéreos no tripulados en la agricultura	14
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1	Ubicación geográfica.....	16
3.2	Características del suelo	16
3.3	Variedades experimentales.....	18
3.4	Características climatológicas	19
3.4.1	Temperatura.....	20
3.4.2	Precipitación	21
3.4.3	Evapotranspiración potencial	22
3.5	Características de los fertilizantes y abonos.....	22
3.6	Otros	23
3.7	Metodología.....	23
3.7.1	Factores en estudio	23
3.7.2	Variables evaluadas	25
3.7.3	Calibración del modelo AquaCrop.....	27
3.7.4	Simulación de escenarios climáticos previstos.....	29
3.7.5	Diseño experimental	30

IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1	Condiciones del experimento	38
4.1.1	Temperatura.....	38
4.1.2	Precipitación	38
4.1.3	Suelo	39
4.2	Variedades de quinua	40
4.3	Fertilización.....	46
4.4	Calibración del modelo	48
4.5	Respuesta del rendimiento bajo escenarios climáticos proyectados	54
V.	CONCLUSIONES.....	59
VI.	RECOMENDACIONES.....	60
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
VIII.	ANEXOS.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Descripción taxonómica de la quinua.....	4
Tabla 2:	Parámetros incorporados al modelo AquaCrop.....	6
Tabla 3:	Información necesaria para la simulación de AquaCrop.....	11
Tabla 4:	Información adicional requerida para la parametrización y validación de AquaCrop.....	12
Tabla 5:	Caracterización del perfil de suelo del campo experimental.....	18
Tabla 6:	Variables climáticas del campo experimental durante campaña 2017/18.....	20
Tabla 7:	Factores, niveles y claves usadas en diseño de parcelas divididas.....	30
Tabla 8:	Fuentes de variación y grados de libertad del diseño de parcelas divididas.....	33
Tabla 9:	Indicadores estadísticos e interpretación de resultados sobre el modelamiento.....	35
Tabla 10:	Factores, niveles y claves usadas en diseño factorial.....	36
Tabla 11:	Fuentes de variación y grados de libertad del diseño factorial.....	37
Tabla 12:	Rendimientos de simulación en AquaCrop 2017/18, fertilización mineral, media de tratamientos de fertilización y producción de biomasa de las tres variedades de quinua.....	41
Tabla 13:	Profundidad radicular según variedad durante campaña 2017/18.....	41
Tabla 14:	promedios de rendimiento en las tres variedades de quinua bajo los tratamientos de fertilización en estudio.....	46
Tabla 15:	Biomasa seca cosechada según factor de fertilización.....	47
Tabla 16:	Profundidad radicular según tratamiento de fertilización durante la campaña 2017/18.....	47
Tabla 17:	Observaciones de campo utilizadas para calibración en AquaCrop.....	49
Tabla 18:	Parámetros de AquaCrop calibrados para las variedades de quinua en estudio.....	49
Tabla 19:	Indicadores de análisis de la calibración.....	54
Tabla 20:	Comparación de medias de rendimiento simulado bajo escenarios de concentraciones de CO ₂ proyectados e históricos.....	55
Tabla 21:	Comparación de medias de rendimiento simulado bajo escenarios de GCM proyectados.....	55

Tabla 22:	Comparación de medias de rendimiento simulado bajo escenarios históricos y proyectados para las variedades de quinua en estudio.....	56
Tabla 23:	Comparación de medias de rendimiento bajo escenarios simulados de RCP, GCM y datos históricos	56
Tabla 24:	Rendimientos promedio de simulación para las variedades de quinua en estudio bajo factores de RCP y GCM en evaluación.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Descripción del balance hídrico en la zona radicular	7
Figura 2:	Esquema de cálculo del modelo AquaCrop	8
Figura 3:	Modelo de cobertura de dosel máxima, reducida y disminuida una vez alcanzada la cobertura máxima	9
Figura 4:	Componentes principales de dinámica suelo-planta-atmósfera de AquaCrop	10
Figura 5:	Imagen satelital de las instalaciones del IRD Sierra y el campo experimental.....	16
Figura 6:	Vistas de calicata y perfil de suelo en campo experimental	17
Figura 7:	Panoja y granos de las variedades Amarilla de Maranganí, Blanca de Junín y Rosada de Huancayo	19
Figura 8:	Temperaturas máximas y mínimas registradas entre el 1/12/2017 y el 30/6/2018.	20
Figura 9:	Precipitación registrada entre el 1/12/2017 y el 30/6/2018.....	21
Figura 10:	Evapotranspiración potencial registrada entre el 1/12/2017 y el 30/6/2018	22
Figura 11:	Instalación de estación meteorológica en el IRD Sierra	25
Figura 12:	Medición de altura de planta y profundidad de raíces	26
Figura 13:	Imagen aérea y medición de cobertura vegetal.....	27
Figura 14:	Trilladora mecánica y cosecha en campo experimental.....	27
Figura 15:	Datos de entrada para el modelo AquaCrop	28
Figura 16:	Distribución espacial de los tratamientos en parcelas divididas	31
Figura 17:	Lotes sembrados el 11 de diciembre del 2017	32
Figura 18:	Simulación en AquaCrop del balance hídrico por variedad durante campaña experimental.....	39
Figura 19:	Módulo de características del perfil de suelo en AquaCrop	40
Figura 20:	Simulación para la variedad Rosada de Huancayo, campaña 2017/18.....	42
Figura 21:	Vista aérea de una subparcela variedad Rosada de Huancayo durante campaña 2017/18	42

Figura 22:	Simulación para la variedad Amarilla de Maranganí, campaña 2017/18	43
Figura 23:	Vista aérea de una subparcela variedad Amarilla Maranganí durante campaña 2017/18	44
Figura 24:	Simulación para la variedad Blanca de Junín, campaña 2017/18	45
Figura 25:	Vista aérea de una subparcela variedad Blanca de Junín durante campaña 2017/18.....	45

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1:	Modelo lineal general: rendimiento vs. bloque, fertilizante, variedad	68
ANEXO 2:	Modelo lineal general: rendimiento grano seco vs. bloque, fertilizante, variedad.....	69
ANEXO 3:	Modelo lineal general: biomasa seca cosecha vs. bloque, fertilizante, variedad	70
ANEXO 4:	Modelo lineal general: índice de cosecha vs. bloque, fertilizante, variedad	71
ANEXO 5:	Modelo lineal general: biomasa kg/h 28/04 vs. bloque, fertilizante, variedad .	72
ANEXO 6:	Modelo lineal general: biomasa kg/h 27/05 vs. bloque, fertilizante, variedad .	73
ANEXO 7:	Modelo lineal general: cobertura vegetal 17/01 vs. bloque, fertilizante, variedad.....	74
ANEXO 8:	Modelo lineal general: cobertura vegetal 18/02 vs. bloque, fertilizante, variedad.....	75
ANEXO 9:	Modelo lineal general: cobertura vegetal 25/03 vs. bloque, fertilizante, variedad.....	76
ANEXO 10:	Modelo lineal general: cobertura vegetal 29/04 vs. bloque, fertilizante, variedad.....	77
ANEXO 11:	Modelo lineal general: profundidad radicular 01/03 vs. bloque, fertilizante, variedad.....	78
ANEXO 12:	Modelo lineal general: profundidad radicular 28/04 vs. bloque, fertilizante, variedad.....	79
ANEXO 13:	Modelo lineal general: profundidad radicular 27/05 vs. bloque, fertilizante, variedad.....	80
ANEXO 14:	Modelo lineal general: biomasa kg/h 25/03 vs. bloque, fertilizante, variedad .	81
ANEXO 15:	Modelo lineal general: profundidad radicular 25/03 vs. bloque, fertilizante, variedad.....	82
ANEXO 16:	Modelo lineal general: rendimiento vs. GCM, RCP, variedad.....	83

LISTA DE ACRONIMOS

AIM	:	Modelo integrado Asia-Pacífico
AMICAF	:	Análisis y mapeo de impactos bajo el cambio climático para la adaptación y la seguridad alimentaria.
B	:	Biomasa producida
CC	:	Cobertura de dosel
CC_{act}	:	Cobertura de dosel simulada
CC_{pot}	:	Cobertura de dosel potencial
CH₄	:	Metano
CO₂	:	Dióxido de carbono
ET_a	:	Evapotranspiración real
ET_o	:	Evapotranspiración de referencia
ET_x	:	Evapotranspiración máxima
FAO	:	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
FC	:	Capacidad de campo
GCAM	:	Modelo de evaluación del cambio global
GCM	:	Modelos de Circulación General
GDD	:	Días grado de crecimiento
HFC	:	Hidrofluorocarburos
HI	:	Índice de cosecha
IMAGE	:	Modelo integrado para evaluar el medio ambiente global
IPCC	:	Panel intergubernamental del cambio climático
IRD	:	Instituto Regional de Desarrollo

K_c	:	Coeficiente del cultivo
K_s	:	Coeficiente de estrés del cultivo
K_y	:	Factor de respuesta del rendimiento
LASPAF	:	Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes
LIA	:	Índice de área foliar
MESSAGE	:	Modelo de alternativas de estrategia de suministro de energía y su impacto ambiental general
MINAGRI	:	Ministerio de Agricultura y Riego
N₂O	:	Óxido nitroso
PWP	:	Punto de marchitez permanente
RCP	:	Trayectorias de Concentración Representativa
TAW	:	Agua Total Disponible
Th₁	:	Umbral hídrico de efecto en la cobertura
Th₂	:	Umbral hídrico de efecto en cierre de estomas
Th₃	:	Umbral de desencadenado de senescencia temprana
T_r	:	Transpiración del cultivo
UNALM	:	Universidad Nacional Agraria La Molina
USDA	:	Departamento de agricultura de los Estados Unidos
WP	:	Productividad del agua
Y	:	Rendimiento cosechado
Y_a	:	Rendimiento real
Y_x	:	Rendimiento máximo

RESUMEN

El modelamiento de cultivos es una práctica cada vez más extendida que permite planificar decisiones frente a escenarios de incertidumbre generados por cambios en las condiciones climáticas. El propósito de esta investigación fue analizar de forma preliminar el uso del modelo AquaCrop en tres variedades de quinua en el valle del Mantaro, para determinar la respuesta del rendimiento de las variedades en estudio bajo escenarios proyectados de cambios en la precipitación, temperatura y concentración ambiental de CO₂ hacia el año 2050. La calibración del modelo se llevó a cabo en el campo experimental del IRD Sierra de La Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicado en el distrito de San Lorenzo, provincia de Jauja, región Junín. Se evaluó el comportamiento de las variedades Blanca de Junín, Amarilla Maranganí y Rosada de Huancayo, bajo tratamientos de fertilización correspondientes a fertilizante mineral, guano de corral, biol y sin fertilización durante la campaña que inició con la siembra el 11 de diciembre de 2017 y finalizó con la cosecha entre mayo y junio de 2018 según la variedad. Se empleó un diseño de parcelas divididas para la evaluación del efecto del fertilizante y un diseño factorial de tres factores, con repetición para evaluar la respuesta en el rendimiento frente a los escenarios climáticos simulados en el modelo AquaCrop calibrado para las tres variedades. La aplicación de fertilizante mineral aumentó los rendimientos y producción de biomasa de forma significativa en comparación al resto de tratamientos. La evaluación de los rendimientos obtenidos de las simulaciones realizadas para cambios en la precipitación, temperatura y concentración ambiental de CO₂ hacia el año 2050, mostraron que la quinua tendrá un comportamiento favorable en comparación al escenario actual, siendo la variedad Blanca de Junín aquella que obtuvo los mayores rendimientos tanto para la campaña en estudio como para los escenarios proyectados.

Palabras clave: *Chenopodium quinoa*, AquaCrop, clima, fertilización, rendimiento.

ABSTRACT

Crop modeling is an increasingly widespread practice that allows planning decisions in the face of uncertainty scenarios generated by changes in climate conditions. The purpose of this investigation was to preliminarily analyze the use of the AquaCrop model in three varieties of quinoa in the Mantaro Valley to determine the response in the yield of the studied varieties under projected scenarios of changes in precipitation, temperature and environmental concentration of CO₂ by the year 2050. The model calibration was carried out in the experimental field of the Sierra Rural Development Institute of the National Agrarian University La Molina, located in San Lorenzo district, Jauja province, Junin region. The behavior of the Blanca de Junín, Amarilla Marangani and Rosada de Huancayo varieties was evaluated under fertilization treatments corresponding to mineral fertilizer, farmyard, biol and without fertilization during the campaign that began with sowing on December 11, 2017 and ended with the harvest between May and June 2018 depending on the variety. A split plot design was used for the evaluation of the effect of the fertilizer and a factorial design of three factors with repetition to evaluate the yield response against the simulated climatic scenarios in the AquaCrop model calibrated for the three varieties. The application of mineral fertilizer increased yields and biomass production significantly compared to the other treatments. The evaluation of the yields obtained from the simulations carried out for changes in the precipitation, temperature and environmental concentration of CO₂ towards the year 2050 showed that quinoa will have a favorable behavior compared to the current scenario, with the Blanca de Junín variety being the one that obtained the higher yields for the campaign under study, as well as for future projected scenarios.

Keywords: *Chenopodium quinoa*, AquaCrop, climate, fertilization, yield.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento global de la población y demanda de alimentos, la creciente escasez en la disponibilidad de recursos como la tierra y el agua y los efectos del cambio climático ejercen conjuntamente una marcada presión sobre el ambiente, generando escenarios cambiantes y adversos en donde se hará necesario el uso de nuevas tecnologías aplicadas a la agricultura (Andrade, 1998; Klare, 2008). El desafío que enfrentamos consiste en producir una mayor cantidad de alimentos en una misma superficie agrícola, asegurando su calidad y el uso sostenible de los recursos involucrados durante su producción (Gebbers & Adamchuk, 2010; Godfray *et al.*, 2010). Frente a esta situación resulta oportuna la investigación y difusión de cultivos que sean más eficientes en la producción de nutrientes para el ser humano, tomando en cuenta que, actualmente, muchos sistemas alimentarios a nivel mundial no están asegurando el requerimiento nutricional de la población (Welch, 2002).

En las últimas décadas el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) ha ganado importancia, tanto a nivel nacional como internacional, debido a cualidades como un excepcional balance entre aceites, proteínas y grasas; su contenido de minerales, vitaminas, antioxidantes (Vega-Galvez, 2010) y sus posibles beneficios nutracéuticos (Abugoch *et al.*, 2009), cualidades que lo identifican como “*superfood*” o superalimento (Wolf, 2010).

El Perú, que declaró el 2013 como “año internacional de la quinua” en reconocimiento a los pueblos andinos que han preservado este grano como alimento para generaciones presentes y futuras (Ku, 2017), es el primer productor de quinua a nivel mundial (OIT, 2012). Esto se logró incrementándose el área destinada a su producción y los recursos destinados a su comercialización, sin embargo, el rendimiento no incrementó de forma paralela al área cultivada (Camarena, 2016).

La sequía corresponde a una de las principales limitantes de la producción agrícola en regiones andinas, recayendo cada vez mayor importancia en la implementación de tecnologías y

estrategias para el uso y administración del recurso hídrico, cada vez más escaso (Higa & Chen, 2010; A. Mujica, Jacobsen, & Ortiz, 1998; Vanuytrecht *et al.*, 2014). AquaCrop, modelo de simulación de crecimiento de los cultivos desarrollado por la FAO, simula la respuesta del rendimiento de los cultivos al agua, proveyendo una herramienta que es actualmente utilizada para determinar fechas y densidades óptimas de siembra; momentos y volúmenes de riego; requerimientos hídricos estacionales y estrategias de riego suplementario y deficitario entre otras aplicaciones (Ferreira *et al.*, 2012; García-Vila & Ferreira, 2012; Steduto *et al.*, 2012).

El escaso uso de modelos de simulación de cultivos aplicados en la producción comercial de quinua en el Perú limita la capacidad de analizar riesgos y tomar decisiones planificadas para mitigar el efecto de las variables climáticas. Por ello, consideramos que la calibración del modelo AquaCrop proveerá una herramienta para mejorar las estrategias de producción y manejo del recurso hídrico en el valle del Mantaro, incrementando con ello el rendimiento y rentabilidad del cultivo de quinua a los productores de la región.

El objetivo del presente trabajo fue analizar, de manera preliminar, el uso del modelo de cultivo AquaCrop de la FAO calibrado en las instalaciones del Instituto Regional de Desarrollo de Sierra de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en tres variedades de quinua en el valle del Mantaro, región de Junín. Los objetivos específicos fueron:

- Evaluar la respuesta de tres variedades de quinua en la producción de biomasa y rendimiento bajo cuatro tratamientos de fertilización en condiciones de secano en el valle del Mantaro durante la campaña 2017/2018.
- Evaluar la confiabilidad de la calibración realizada con el modelo AquaCrop para tres variedades de quinua durante la campaña 2017/2018 en el valle del Mantaro.
- Evaluar el comportamiento futuro del rendimiento de tres variedades de quinua bajo escenarios previstos de cambios en la precipitación, temperatura y concentraciones ambientales de CO₂ en el valle del Mantaro durante los años 2049, 2050 y 2051 haciendo uso del modelo de cultivo AquaCrop.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. El cultivo de quinua

La quinua, uno de los principales alimentos en las regiones andinas, se caracteriza por el uso completo de la planta, una amplia adaptabilidad a condiciones agroecológicas y una alta calidad como alimento. Esta última característica ha conllevado al aumento de la demanda de quinua en Estados Unidos, Europa y Asia, tanto para su consumo directo como procesado (Jacobsen, 2003; Mujica & Jacobsen, 2006).

2.1.1. Descripción botánica

En la guía de la quinua (Aguilar & Gomez, 2016) se describe la morfología de la quinua de la siguiente manera:

- a Raíz: de tipo pivotante, consta de una raíz principal de la cual salen un gran número de raíces laterales muy ramificadas. La longitud de estas varía entre 0.8 a 1.5 m.
- b Tallo: es cilíndrico en la unión con el cuello de la raíz, volviéndose anguloso a medida que se aleja de esta y se acerca a zonas de nacimiento de hojas y ramas. El color del tallo puede variar de acuerdo a la fenología, mientras que la ramificación puede ser sencilla o ramificada en variantes.
- c Hojas: pueden ser de color verde, rosado, rojo y púrpura. Son polimorfas en la misma planta, de formas triangulares o romboidales en el follaje y triangulares o lanceoladas en la inflorescencia, con márgenes enteros, dentados o aserrados.
- d Inflorescencia: consiste de una panoja con una longitud variable de 15 a 70 cm generalmente encontrada en el ápice de la planta y en el ápice de las ramas.
- e Fruto: Es un aquenio de forma lenticular, elipsoidal, cónico o esferoidal, cubierto por el perigonio sepaloide o las envolturas florales que rodean el fruto. El fruto está constituido por pericarpio y la semilla, alcanzando un diámetro de entre 1.5 a 3 mm.

- f Semilla: La semilla presenta tres partes definidas, el epispermo, tejido que cubre la semilla y está adherida al pericarpio; el embrión, formado por dos cotiledones y la radícula; y el perispermo, principal tejido de almacenamiento.

2.1.2. Taxonomía

Tabla 1: Descripción taxonómica de la quinua

Taxonomía - <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.	
Reino	Plantae
Subreino vegetal	Tracheobionta
Super división	Spermatophyta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Caryophyllaceae
Orden	Caryophyllales
Familia	Chenopodiaceae
Género	<i>Chenopodium</i>
Especie	<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.

Adaptado de Vásquez *et al.*, 2016.

2.1.3. Nutrición mineral y fertilización

A pesar de ser esta una práctica necesaria para la obtención de óptimos rendimientos, en la agricultura tradicional la quinua no es fertilizada, optándose por el aprovechamiento de la fertilidad residual generada por una adecuada fertilización en cultivos de mayor interés comercial dentro de la misma campaña (García, 1985; Tapia *et al.*, 1979).

Alvarez y von Rütte (1990) señalan que la quinua responde al nitrógeno para obtener rendimientos elevados con dosis de 80 kg/ha, recomendando fraccionar la aplicación en dos momentos, durante la siembra y antes de floración. Recomiendan, además, la aplicación de fertilizantes fosforados en cantidades que varían de 40 a 80 kg/ha. Suele omitirse la aplicación de fertilizantes a base de potasio en suelos andinos de Sudamérica por la gran disponibilidad en los mismos (Deza, 2018). Tapia *et al.* (1979) señalan que la aplicación de estiércol, guano de isla y materia orgánica incrementa los rendimientos en cantidades variables, resaltando la importancia de una adecuada fuente de micronutriente junto a los aportes de nitrógeno y fósforo para un adecuado desarrollo radicular y la obtención de buenos rendimientos.

2.1.4. Mecanismo fotosintético de la quinua (C₃)

La quinua presenta un mecanismo fotosintético en donde el primer producto de la fijación fotosintética de CO₂ corresponde a un compuesto de tres átomos de carbono (ácido-3-fosfoglicérico) que es liberado en el entorno de la enzima rubisco para continuar la ruta metabólica (Azcon-Bieto & Talón, 2013). Cultivos como el trigo, el arroz, la papa y la quinua se encuentran en este grupo de plantas conocido como C₃, plantas en que el flujo de CO₂ a nivel celular se produce a favor de la gradiente de concentración.

A diferencia de las plantas tipo C₄ y CAM; que poseen otros mecanismos que permiten concentrar el CO₂ en estructuras especializadas; las plantas C₃ dependen de la difusión para la absorción de este compuesto con efectos directos en la fotosíntesis (Azcon-Bieto & Talón, 2013; Lara & Andreo, 2011; von Caemmerer & Evans, 2010).

2.2. Modelo agrometeorológico AquaCrop

AquaCrop es un modelo descriptivo, desarrollado por la División de Tierra y Agua de la FAO, que simula la biomasa y el rendimiento potencial cosechable de un cultivo en función a la disponibilidad de agua (Fernández, 2013). AquaCrop permite, además, realizar simulaciones de la respuesta del rendimiento al agua bajo diversas condiciones ambientales y de manejo agronómico (Steduto *et al.*, 2012) mediante módulos incorporados al modelo referentes al clima, el cultivo, el suelo y el manejo del campo.

El modelo ha sido utilizado para simular el crecimiento de diversos cultivos incluyendo algodón, maíz, trigo, cebada, girasol, tomate, papa y quinua y ha sido validado en diversas locaciones en el norte de América, Europa, sur y este de África; estudios que consiguieron simular satisfactoriamente los rendimientos de los cultivos y la producción de biomasa, la productividad del agua del suelo bajo condiciones de secano, riego completo, deficitario y estrés por fertilidad del suelo (Akumaga, Tarhule, & Yusuf, 2017; Montoya, Camargo, Ortega, Córcoles, & Domínguez, 2016).

Tabla 2: Parámetros incorporados al modelo AquaCrop

Parámetros del modelo de cultivo AquaCrop	
Clima	Temperatura máxima del aire Temperatura mínima del aire Precipitación Demanda de evaporación Concentración media anual de dióxido de carbono
Cultivo	Fenología Cobertura de dosel Profundidad de raíces Transpiración del cultivo Evaporación del suelo Producción de biomasa Rendimiento cosechable (índice de cosecha)
Suelo	Características físicas del perfil Características de la capa freática (si la hubiese)
Manejo	Manejo del campo

2.2.1. Descripción del modelo

Steduto *et al.* (2012) describen como FAO, a finales de los años setenta, abordó la relación entre el rendimiento del cultivo y el uso del agua proponiendo una ecuación sencilla que relacionaba la respuesta del rendimiento a la evapotranspiración como se expresa a continuación:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = Ky\left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right)$$

A pesar de la gran acogida de los estudios derivados de esta ecuación, esta se encuentra limitada para realizar estimaciones precisas de las respuestas del rendimiento al agua porque deja de lado otra serie de factores como los nutrientes o la genética de variedades cultivadas, factores que también influyen en la respuesta al agua, haciendo que sean necesarios ajustes para cada condición específica.

El modelo trabaja en función del agua disponible para realizar la simulación de biomasa y posteriormente del rendimiento (Fernández, 2013), cumpliendo el suelo la función de un reservorio de agua donde los registros de ingresos y egresos de agua al sistema permitirán calcular posteriormente el volumen de agua retenido y disponible en la zona radicular.

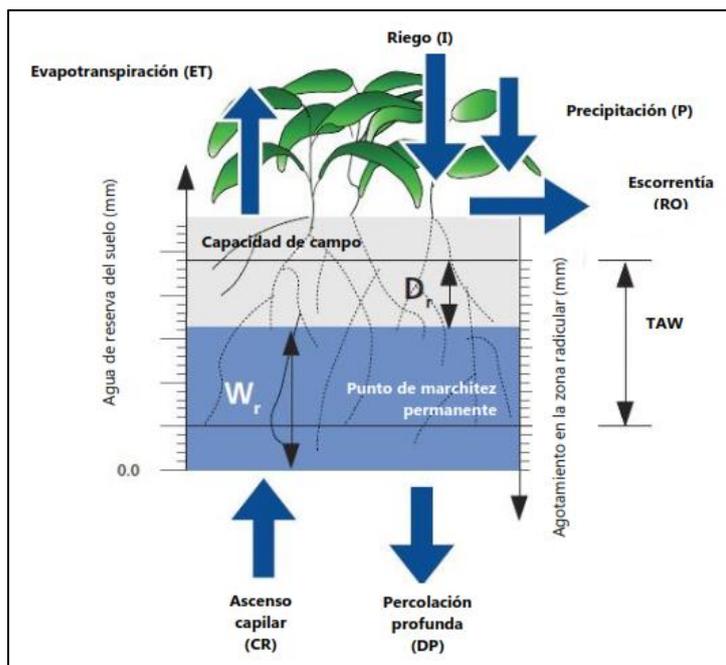


Figura 1: Descripción del balance hídrico en la zona radicular

Fuente: Steduto *et al.* (2012)

La relación entre el uso del agua para la obtención de rendimiento se disgrega en los dos siguientes criterios: el primero, la productividad del agua, trabaja en función de la biomasa que puede llegar a ser producida por unidad de agua transpirada por la planta; el segundo, la productividad del agua evapotranspirada, expresa la relación entre los kilogramos de producto cosechado por agua evapotranspirada, utilizando para ello el agua transpirada por la planta y evaporada de la superficie del suelo.

La evapotranspiración, como descrita por Allen *et al.* (1998), corresponde a un concepto que engloba dos procesos separados, la evaporación y la transpiración. La evaporación corresponde a un proceso en el cual el agua, en estado líquido, es convertida a vapor de agua y removida en esta forma de la superficie de evaporación. La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en el tejido vegetal y su remoción de la misma en forma de vapor hacia la atmósfera, esta se da en mayor medida a través del tejido estomático. De aquí la importancia de establecer parámetros sobre el crecimiento de la cobertura de dosel y su desarrollo a lo largo del ciclo de cultivo.

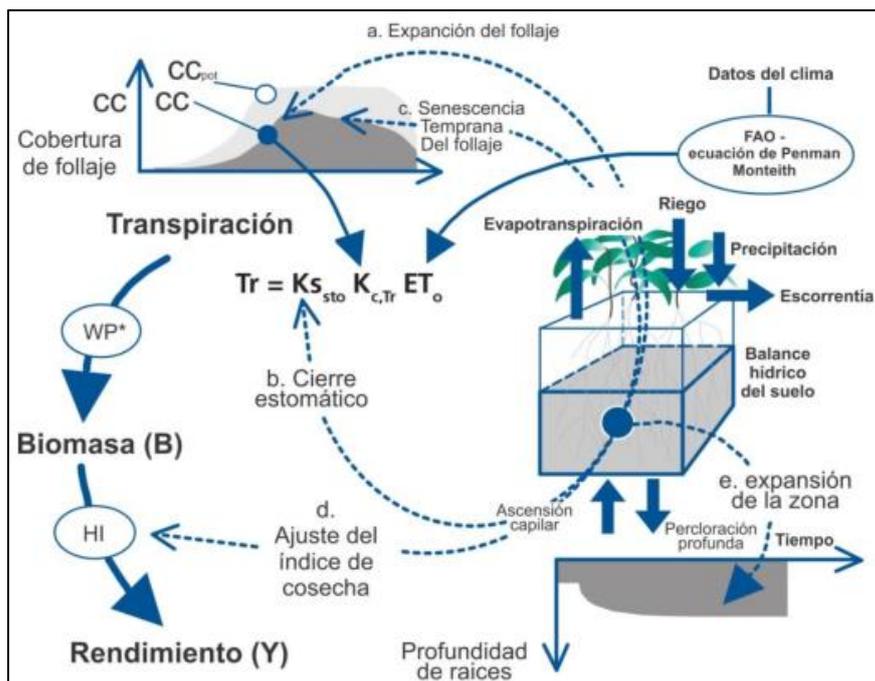


Figura 2: Esquema de cálculo del modelo AquaCrop

Fuente: Steduto *et al.* (2012)

Los tres principales factores que afectan la evapotranspiración engloban parámetros correspondientes al clima; radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento; al cultivo; variedad, fase fenológica, resistencia a la transpiración, altura, vigor y cobertura vegetal entre otros; y a las condiciones de manejo y desarrollo del mismo, como fertilidad del suelo, condiciones del perfil de suelo, riego, sanidad agrícola, etc. El estrés en que pueda incurrir la planta durante su ciclo vegetativo es también tomado en cuenta durante la simulación, este puede ser derivado de temperaturas extremas a las requeridas por la planta, superior o inferior al rango de crecimiento; estrés por falta de disponibilidad de nutrientes en el suelo o el efecto de la salinidad de los suelos al reducir la cantidad de agua disponible para la planta, ya sea disminuyendo la cobertura total que alcanza el cultivo sobre el campo, el tiempo requerido en alcanzarla o acelerando el periodo de senescencia. Los efectos del estrés se describen por coeficientes de estrés ya que estos afectan de distinta forma e intensidad los diversos procesos del crecimiento y desarrollo del cultivo con el que se trabaja, por ello cada proceso cuenta con un coeficiente de estrés para disgregar el efecto de estos en la simulación, su efecto en cada proceso simulado y los límites de estos, por ejemplo, el efecto del estrés hídrico tiene funciones de respuesta sobre la expansión foliar, senescencia, conductancia estomática e índice de cosecha, diagramados como (1), (2), (3) y (4) respectivamente en la figura 4.

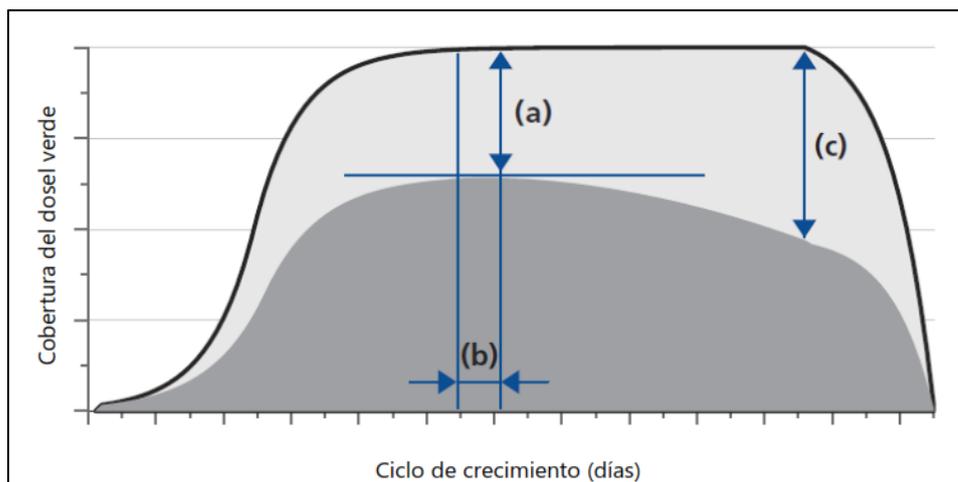


Figura 3: Modelo de cobertura de dosel máxima (a), reducida (b) y disminuida una vez alcanzada la cobertura máxima (c)

Fuente: Steduto *et al.* (2012)

La transpiración del cultivo es calculada por el modelo multiplicando la evapotranspiración potencial por el coeficiente de transpiración del cultivo, adicionalmente, se consideran los efectos por el estrés térmico y el estrés hídrico, siendo representados mediante la siguiente ecuación:

$$Tr = Ks \times KsTr \times KcTr \times ETo$$

Steduto *et al.* (2012) indican que el modelo AquaCrop evoluciono a partir de separar la evaporación no productiva del suelo de la transpiración productiva del cultivo, estimando la producción de biomasa a partir de la transpiración y la productividad del agua del cultivo, expresándola como la biomasa aérea seca producida por el cultivo por unidad de área en función al agua transpirada y dando lugar a la siguiente ecuación fundamental para el motor de crecimiento del AquaCrop:

$$B = WP \times \sum Tr$$

Desde el inicio de la floración, el índice de cosecha aumenta de manera gradual hasta alcanzar su valor referencial al momento de madurez fisiológica, siendo este periodo durante el cual se va formando el producto cosechable o rendimiento. La reducción en la producción de biomasa, potencialmente causada por diversos factores, tendrá reducción en el rendimiento final independientemente de su efecto en el valor del índice de cosecha. Tomando en cuenta que en la mayoría de los cultivos solo una parte de la biomasa producida se destina a los órganos

cosechables para producir rendimiento, se aplicó la relación entre el rendimiento y la biomasa con el índice de cosecha, permitiendo considerar los efectos de las condiciones ambientales y el estrés en ambos factores por separado, en donde:

$$Y = HI \times B$$

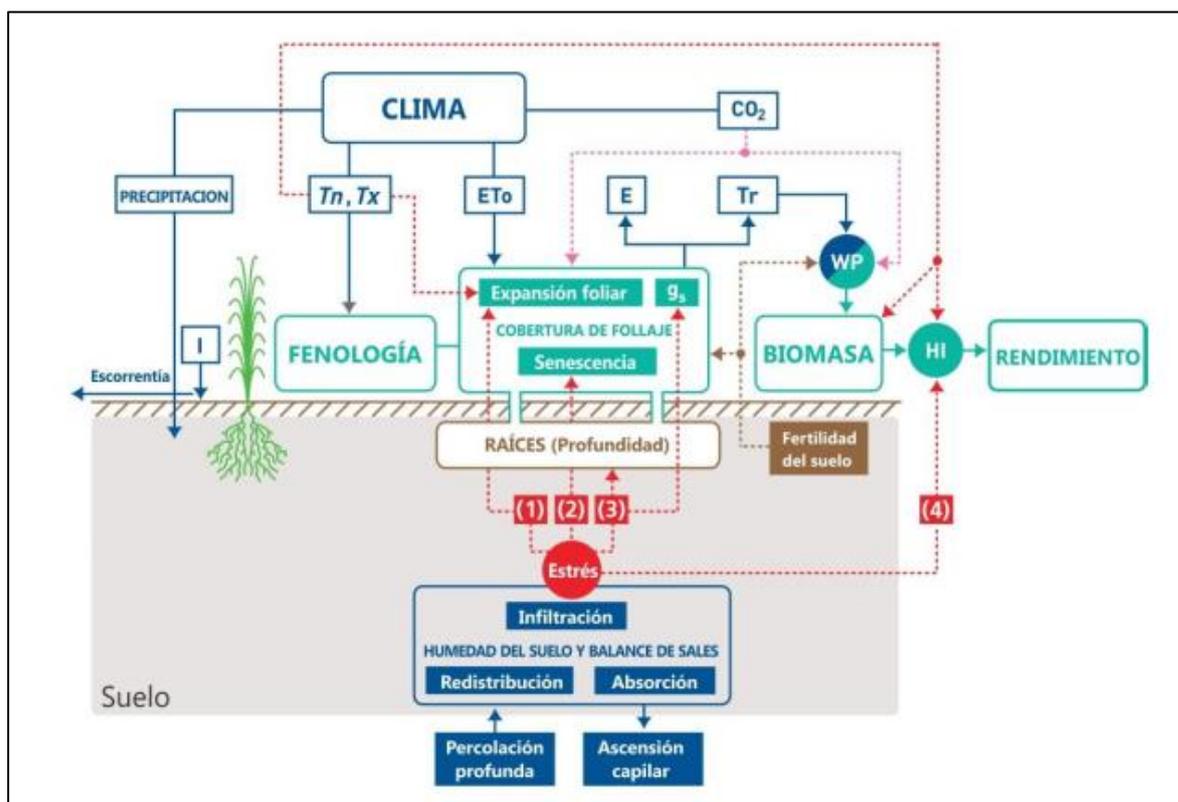


Figura 4: Componentes principales de dinámica suelo-planta-atmósfera de AquaCrop

Fuente: Steduto *et al.* (2012)

2.2.2. Requerimientos de la modelación

Hsiao *et al.* (2012) señalan que para lograr utilizar el modelo AquaCrop se necesitan mínimamente los datos enumerados en la columna 1 de la tabla 3, mientras que la información de la segunda columna corresponde a información adicional para hacer más fiable la simulación. Para validar y parametrizar el modelo son necesarios una serie de datos detallados y precisos, estos se listan en la tabla 4. La información de la primera columna de esta tabla permite, junto a la información de la tabla 3, obtener una validación razonable del modelo. La segunda columna incluye la información que se necesita para validar el modelo para un uso general y calibrar parámetros conservativos, que servirían para un rango amplio de climas, suelos y regímenes hídricos.

Tabla 3: Información necesaria para la simulación de AquaCrop

Parámetro	Requerimiento mínimo	Datos adicionales para una simulación confiable
Cultivo	<ul style="list-style-type: none"> - Rendimiento de grano y la proporción del peso del grano seco con respecto a la biomasa área; es decir, una idea aproximada del índice de cosecha (HI). - Fechas de siembra y cosecha (pueden ser aproximadas) y duración estimada del ciclo biológico del cultivo. - Dosis de siembra y porcentaje de germinación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Biomasa área al momento de la cosecha. - Fecha de emergencia (sea en su inicio o la etapa próxima a la emergencia total) y fecha de madurez del grano. - Densidad de plantación. - Profundidad máxima estimada de raíces. - Índice máximo de área foliar verde (LAI) o indicación del alcance de máxima cobertura del dosel o cobertura del dosel en un momento dado.
Clima y ET	<ul style="list-style-type: none"> - Valores medio de 10 días o mensuales de temperatura mínima y máxima e indicaciones del porcentaje de días soleados, y regímenes de viento y humedad. - Latitud y elevación. - Datos de evaporación por el método de tanque con información sobre el tipo de tanque y si está ubicado en un entorno seco o verde, para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o). - Datos de la precipitación diaria. 	<ul style="list-style-type: none"> - Valores medios semanales o de 10 días de radiación solar (global) diaria u horas de luz solar, temperatura mínima y máxima, humedad relativa mínima y máxima, y velocidad del viento. - Precipitación diaria. - Evapotranspiración (ET) estimada.
Suelo y fertilidad	<ul style="list-style-type: none"> - Clase textural del suelo e indicación de la variación con la profundidad. - Indicación de la pendiente del suelo y la capacidad de retención de humedad del suelo. - Indicación de la fertilidad natural del suelo. - Practicas generales de fertilización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Texturas de las diversas capas (u horizontes) del suelo, y cualquier capa que limite el crecimiento de las raíces y su profundidad.
Riego y Agua del suelo	<ul style="list-style-type: none"> - Método de aplicación del agua y calendario aproximado de riego. - Idea aproximada del contenido de humedad del suelo al momento de siembra, basada en el nivel de precipitación en meses anteriores y el cultivo que se sembró antes del actual. 	<ul style="list-style-type: none"> - Estimación del contenido de humedad del suelo al momento de la siembra, basado en alguna medición u observación cercana.

Fuente: Hsiao *et al.* (2012)

Tabla 4: Información adicional requerida para la parametrización y validación de AquaCrop

Parámetro	Requerimientos mínimos, además de datos adicionales indicados en la tabla 3 (anterior)	Datos adicionales para una parametrización confiable
Cultivo	<ul style="list-style-type: none"> - Mediciones periódicas del índice de área foliar (LAI) o la cobertura del dosel durante la estación. - Mediciones periódicas de la biomasa aérea durante la estación. - Fecha en que el dosel se empieza a volver visiblemente amarillo. - Medición de la profundidad de raíces. - Signos de estrés hídrico y fechas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Datos de la columna 1, pero obtenido de diferentes lugares y climas, en diferentes tipos de suelo.
Clima y ET	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura y humedad diaria, mínima y máxima. - Radiación solar diaria y velocidad del viento. - ET por balance de agua del suelo (opcional). 	<ul style="list-style-type: none"> - Datos de la columna 1, pero obtenido de diferentes lugares y climas, en diferentes tipos de suelo. - Medición diaria de la ET.
Suelo y fertilidad	<ul style="list-style-type: none"> - Debe tener un tratamiento con fertilidad óptima del suelo. - Capacidad de campo y punto de marchitez permanente de los horizontes del suelo. - Tasa de infiltración o conductividad hidráulica saturada del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, para diferentes tipos de suelo.
Riego y Agua del suelo	<ul style="list-style-type: none"> - Debe incluir un tratamiento bien regado (riego completo) y un tratamiento de estrés hídrico. - Cantidad de agua que se aplica en cada uno de los riegos. - Medición o buena estimación de contenido de humedad del suelo en diferentes profundidades al momento de siembra. - Mediciones periódicas del contenido de humedad del suelo en diversas profundidades de la zona radicular (alternativa opcional al balance de agua del suelo). 	<ul style="list-style-type: none"> - Datos de la columna 1, pero obtenidos en diferentes lugares y climas, para diferentes tipos de suelo. - Debe incluir tratamientos con estrés hídrico en diferentes niveles de severidad.

Fuente: Hsiao *et al.* (2012)

2.3. Cambio climático

El cambio climático, consecuencia del calentamiento global, está ligado a los gases de efecto invernadero como el CO₂, CH₄, N₂O e HFC, siendo el CO₂ el más importante al representar tres cuartos de los gases de efecto invernadero generados por el hombre (Stern, 2008). Estos gases son acumulados en la atmósfera reteniendo energía en forma de calor, aumentando con ello la temperatura media global. La magnitud del aumento en la temperatura media global en respuesta al incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera responde al concepto de sensibilidad climática. El equilibrio de la sensibilidad climática es estimada por modelos de circulación atmosférica general que estiman variaciones en la temperatura de entre 2 a 5 °C, siendo esta variación la mayor fuente de incertidumbre en los escenarios de cambio climático proyectados (Bony *et al.*, 2006).

Este fenómeno, caracterizado por su alta complejidad, tiene alta probabilidad de incidir en cambios sobre la precipitación, generar un ciclo hídrico más activo y aumentar la capacidad de retener agua por parte de la atmósfera a consecuencia de cambios en la circulación atmosférica (Bord, O'Connor, & Fisher, 2000; Dore, 2005). Estos cambios implican uno de los mayores desafíos que enfrentamos en la actualidad, afectando la producción de alimentos y las características socioeconómicas de los productores en la medida que estos limiten o incrementen su habilidad de adaptación frente a estos fenómenos (Habtemariam, Abate Kassa, & Gandorfer, 2017; Tai, Martin, & Heald, 2014; Wheeler & Braun, 2013).

2.3.1. Pronóstico de escenarios climáticos para el Perú

Diversos factores son tomados en cuenta cuando se busca realizar predicciones acerca de la forma en que el calentamiento global afectará al cambio climático, siendo la cantidad de gases de efecto invernadero acumulados en el ambiente una variable clave para la determinación del mismo, por ello, y con el fin de que las investigaciones y estudios de distintos autores puedan ser complementarios y comparables, se han establecido escenarios estandarizados con el fin de mantener condiciones y proyecciones consistentes en la rama de investigación climática. El panel intergubernamental del cambio climático (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) ha determinado cuatro trayectorias de concentración representativa (RCP - *Representative Concentration Path*) que proveen de proyecciones de las concentraciones atmosféricas de gases invernadero, estos son:

- RCP 8.5: desarrollado usando el modelo MESSAGE, se caracteriza por el incremento en las emisiones de gases invernadero a lo largo del tiempo, conllevando así a una alta concentración de estos en la atmósfera (Riahi *et al.*, 2011).
- RCP 6: Este modelo, desarrollado por AIM, simula una estabilización en las emisiones después del año 2100 asumiendo el uso de tecnología y estrategias para la reducción de las emisiones de gases invernaderos (Hijioka, Matsuoka, Nishimoto, Masui, & Kainuma, 2008).
- RCP 4.5: GCAM fue quien desarrolló este modelo, caracterizado por un escenario de estabilidad en las emisiones a partir del año 2100 (Thomson *et al.*, 2011).
- RCP 2.6: Este escenario, desarrollado por IMAGE, representa condiciones de baja emisión de gases invernadero, consecuentemente, la concentración de estos gases en la atmósfera se ve también disminuida (van Vuuren *et al.*, 2011).

La FAO y el MINAGRI evaluaron, en el marco del proyecto AMICAF, el impacto del cambio climático en el Perú con una proyección hacia el año 2050. Para ello los modelos de circulación general (GCM – *General Circulation Model*) MPI-ESM-MR, CANESM2 y CNRM-CM5 fueron combinados con dos caminos de concentración representativa para generar seis proyecciones utilizando metodología de regionalización estadística haciendo uso de los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5 (FAO, 2017). Los modelos MPI-ESM-MR, CANESM2 y CNRM-CM5 difieren en el instituto desarrollador, modelamiento y resolución del mismo; estos fueron desarrollados el Instituto Max Planck de meteorología (*Max-Planck-Institut Für Meteorologie*), el Centro canadiense para el modelamiento y análisis del clima (*Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*) y el Centro nacional de investigación meteorológica (*Centre National de Recherches Météorologiques*) respectivamente.

2.4. Uso de vehículos aéreos no tripulados en la agricultura

Los vehículos aéreos no tripulados proveen una forma eficiente y veloz de analizar las condiciones de campo en áreas extensas y en forma remota, aplicación mejorada con el desarrollo de sensores adaptados a estos vehículos (George *et al.*, 2013; Honkavaara *et al.*, 2013). Actualmente su uso, orientado a la agricultura de precisión, permite detectar remotamente las propiedades del suelo y cultivos, determinar la cobertura vegetal, biomasa,

crecimiento del cultivo, sitios específicos para la aplicación de herbicidas, fungicidas y monitoreo de la senescencia para la optimización de logística de la cosecha, todo esto de manera casi inmediata y no destructiva (Grenzdörffer, Engel, & Teichert, 2008; Primicerio *et al.*, 2012).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica

El presente trabajo de investigación se realizó durante la campaña 2017/18 bajo condiciones de campo en el Instituto Regional de Desarrollo Sierra de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicado en la provincia de Jauja, región Junín, correspondiente a la latitud $11^{\circ}51'36''$ S y longitud $75^{\circ}23'52''$ W, a una altitud de 3200 m.s.n.m. La figura 5 muestra una vista satelital de las instalaciones del IRD Sierra y el campo experimental.



Figura 5: Imagen satelital de las instalaciones del IRD Sierra y el campo experimental

Fuente: www.maps.google.com

3.2. Características del suelo

El campo experimental fue cultivado anteriormente con alfalfa y avena forrajera con fines de alimentación para ganado lechero mediante pastoreo y cortes dependiendo de la temporada. La fisiografía del campo corresponde a una terraza alta plana con una pendiente aproximada de 10 %, una permeabilidad moderadamente rápida, un drenaje algo excesivo y un nivel de pedregosidad que aumenta en cada perfil en dirección hacia el material parental.

El suelo del campo en donde se realizó el experimento posee material parental de origen aluvial, regímenes de humedad ústico y temperatura méxico, características que permitieron clasificarlo como un Entic Haplustolls (USDA, 2014).



Figura 6: Vistas de calicata y perfil de suelo en campo experimental.

Se realizó una calicata con el fin de evaluar el perfil de suelo del campo experimental, las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (LASPAF) de la UNALM. Se logró distinguir cinco horizontes durante la evaluación del perfil, todos ellos con estructura de tipo granular. Predominando la arena como componente textural, de 0 a 46 cm se determinó una textura de tipo franco arenosa, seguida por arena franca y arenosa en los estratos de 46 a 69 y 69 a 145 cm correspondientemente. El pH varió de ligeramente alcalino a moderadamente alcalino en el perfil, mientras que la salinidad no supero valores de 0.55 dS/m. El porcentaje de materia orgánica alcanzó el 3 % en el perfil superficial, disminuyendo a 1.04, 0.40, 0.14 y 0.14 % en los siguientes horizontes. La presencia de carbonatos fue nula en el horizonte Ap, alcanzando niveles de 13.80, 21.00, 18.10 y 18.10 % en los horizontes AC, 2C, 2C2 y 3C respectivamente, como se detalla en la tabla 5.

Tabla 5: Caracterización del perfil de suelo del campo experimental

Horizonte	Ap	AC	2C	2C2	3C
Profundidad (cm)	0 - 22	22 - 46	46 - 69	69 - 90	90 - 145
Color (seco)	7.5 YR 3/3	7.5 YR 4/3	7.5 YR 7/1	7.5 YR 8/2	7.5 YR 7/1
Estructura	granular	granular	granular	granular	granular
Consistencia	friable	friable	duro	suelto	suelto
Modificadores texturales	gravillas y gravas redondeadas	gravas redondeadas	gravas redondeadas	gravas redondeadas	gravas redondeadas
Modificadores texturales (% vol.)	25	60	90	90	90
CaCO ₃ (%)	0.00	13.80	21.00	18.10	18.10
Materia orgánica (%)	3.00	1.04	0.40	0.14	0.14
Arena (%)	44	76	88	92	92
Limo (%)	26	8	6	2	4
Arcilla (%)	30	16	6	6	4
Clase textural	franco arenoso	franco arenoso	arena franca	arenoso	arenoso
pH (1:1)	7.30	8.09	8.21	8.10	8.20
CE (1:1) - (dS/m)	0.20	0.25	0.56	0.54	0.55
CC (%)	28.13	16.35	10.76	8.95	8.00
PMP (%)	16.03	8.38	4.46	3.19	2.52

3.3. Variedades experimentales

La producción de quinua en el Perú se concentra en el altiplano y valles interandinos; sin embargo, su elasticidad genética ha permitido adaptar su producción a regiones de la costa del país (Apaza *et al.*, 2013). Las tres variedades empleadas durante la investigación, que corresponden a variedades comerciales utilizadas en la localidad y adaptadas a valles interandinos (Aguilar & Gomez, 2016), son descritas a continuación:

- a. Variedad Amarilla Maranganí: es una variedad tradicional procedente de la provincia de Canchis – Sicuani, desarrollada a través de selección masal, con una óptima adaptación a los pisos de valles interandinos de las regiones de Cusco y Apurímac hasta los 3650 m.s.n.m. Su ciclo vegetativo oscila entre 190 y 210 días, alcanzando un rendimiento promedio de 3.50 t/ha. Es moderadamente tolerante a la baja temperatura, la sequía y tolerante a excesos de humedad.
- b. Variedad Blanca de Junín: desarrollada por la Universidad Nacional del Centro en la región de Junín mediante selección masal, muestra una adaptación óptima en los pisos de valles

interandinos hasta los 3500 m.s.n.m. Con un ciclo vegetativo que varía entre 160 y 180 días, registra un rendimiento promedio de 2.50 t/ha. Es susceptible a las bajas temperaturas, moderadamente tolerante a la sequía y tolerante a la humedad.

- c. Variedad Rosada de Huancayo: adaptada a la cuenca del Mantaro de 3200 a 3400 m.s.n.m. y desarrollada por la Universidad Nacional del Centro, esta variedad registra un ciclo vegetativo de 170 días. El rendimiento promedio de esta variedad es de 2.80 t/ha. Se reporta como moderadamente tolerante a la sequía y susceptible a las bajas temperaturas y exceso de humedad.



Figura 7: Panoja y granos de las variedades Amarilla de Maranganí (a), Blanca de Junín (b) y Rosada de Huancayo (c)

Fuente: Apaza *et al.* (2013)

3.4. Características climatológicas

El valle del Mantaro presenta una temperatura media anual de 11.7 °C y una precipitación aproximada de 750 mm al año, siendo los sistemas de alta presión atmosférica generados por el anticiclón del Atlántico sur y Pacífico sur, que se ubica cerca de las costas de Brasil y Chile, las corrientes oceánicas que influyen en las condiciones ambientales de la zona (Arroyo, 2011). La provincia de Jauja, donde se ubica el IRD, se clasifica como una zona de vida Bosque Húmedo Montano. La información climatológica del campo experimental fue obtenida gracias a una estación meteorológica instalada en el IRD. En la tabla 6 se detalla la temperatura máxima, media y mínima, precipitación y evapotranspiración potencial desde diciembre del 2017 hasta junio del 2018.

Tabla 6: variables climáticas del campo experimental durante campaña 2017/18

Mes	Temperatura (°C)			Precipitación (mm)	ET _o (mm)
	máxima	media	mínima		
Diciembre	24.2	13.2	4.2	86.5	135.2
Enero	23.4	12.1	3.2	125.4	125.9
Febrero	22.2	13.1	5.2	155.3	115.4
Marzo	22.2	12.9	4.0	126.2	122.7
Abril	21.2	11.6	0.6	47.7	115.0
Mayo	22.0	11.2	-2.4	55.0	118.5
Junio	20.2	9.8	-2.4	2.3	99.6

3.4.1. Temperatura

La zona se caracteriza por, normalmente, registrar temperaturas mínimas durante los meses de junio y julio alcanzando las máximas entre los meses de enero y febrero. Durante la presente campaña los valores máximos de temperatura se alcanzaron en diciembre, llegando a 24 °C, mientras los mínimos fueron registrados en mayo y julio, con temperaturas de -2.4 °C. Los valores de temperatura, tanto máximos, mínimos y promedios, así como la distribución temporal de los mismos, deben ser tomados en cuenta para la planificación del calendario agrícola. Esto debido a que las especies cultivadas, de acuerdo a su adaptación y variabilidad genética, poseen rangos óptimos y tolerables de crecimiento y desarrollo dentro de los cuales podrán alcanzar su potencial de rendimiento. El efecto que divergencias fuera de este rango puedan tener sobre la producción dependerá de la magnitud en que se alejen de estos, el periodo y frecuencia al que se encuentre expuestos y la sensibilidad de la etapa o fase fenológica en la que se encuentre el cultivo.

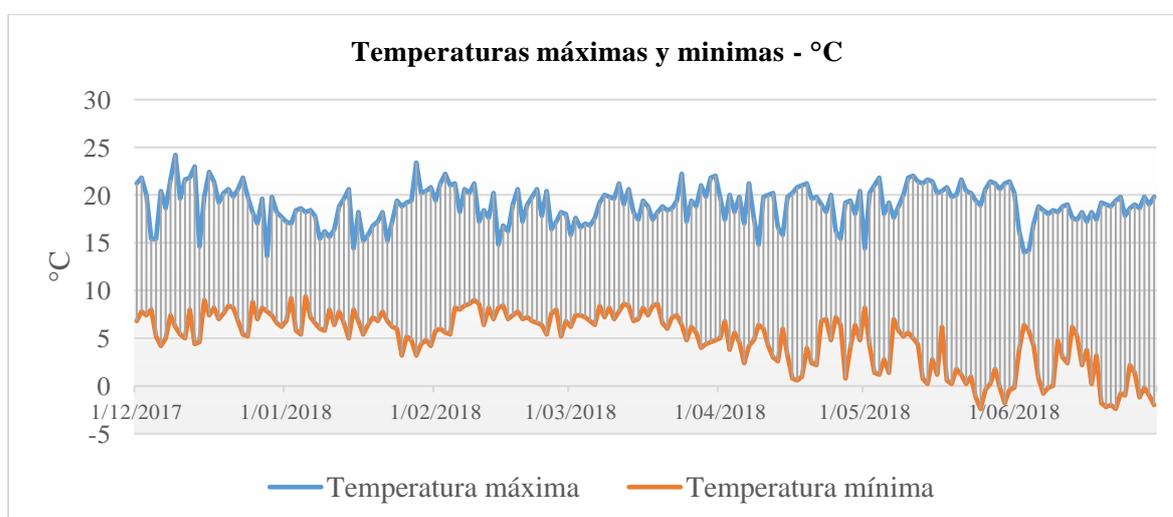


Figura 8: Temperaturas máximas y mínimas registradas entre el 1/12/2017 y el 30/6/2018

3.4.2. Precipitación

En la zona se considera como temporada seca a los meses comprendidos entre mayo y agosto, llegando la precipitación a sus valores mínimos durante el mes de junio. El inicio de la temporada de lluvias se da en septiembre, incrementando gradualmente durante los meses siguientes y concentrándose en el primer trimestre del año. El registro de la precipitación coincide con la información local, registrándose valores de 125.4, 155.3 y 126.2 mm de precipitación durante los meses de enero, febrero y marzo, 47.7 y 55.0 mm en los meses de abril y mayo, reduciéndose a 2.3 mm durante el mes de junio. La disponibilidad de agua es una limitante para la producción agrícola, cuyo requerimiento es creciente durante la campaña e incide directamente sobre el rendimiento. La precipitación es la única fuente de agua disponible bajo condiciones de secano, por ello, es necesario prever los requerimientos hídricos del cultivo con la precipitación durante la campaña. Además, la distribución temporal de la precipitación influirá en la medida que esta pueda estar disponible para el cultivo. Perdidas por escorrentía superficial, percolación profunda, intervalos ausentes de lluvia y la capacidad de retención de agua por parte del suelo deben ser tomados en cuenta para una adecuada planificación al analizar promedios de precipitación.

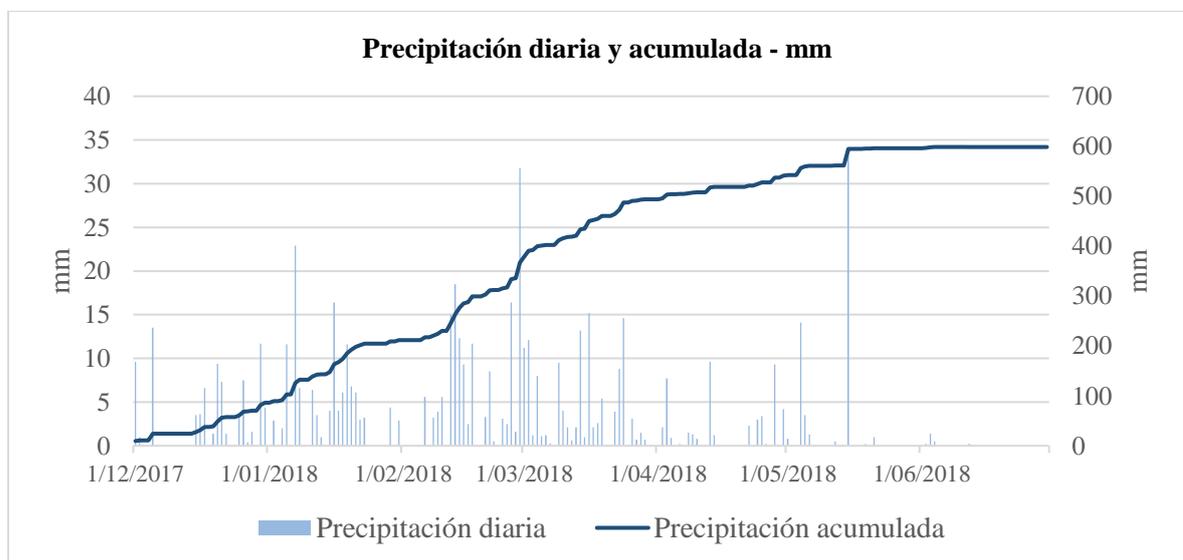


Figura 9: Precipitación registrada entre el 1/12/2017 y el 30/6/2018

3.4.3. Evapotranspiración potencial

El concepto de evapotranspiración potencial corresponde a la tasa de evapotranspiración de un cultivo de referencia, un cultivo hipotético de pasto con características específicas, sin restricciones de agua y tiene el fin de estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo; por ello, se ve afectada únicamente por parámetros climáticos (Cleves *et al.*, 2016). Junto a coeficientes que varían por cultivo y ajustes debidos a estrés de tipo hídrico y ambiental, la evapotranspiración potencial permite estimar la evapotranspiración del cultivo a lo largo de la campaña que bajo condiciones de secano será únicamente cubierta por la precipitación local. Este requerimiento hídrico puede ser contrastado con las estimaciones de precipitación para determinar si será viable la producción, así como la factibilidad de estrategias de riego complementario o deficitario. La evapotranspiración potencial mensual registrada fue de 135.2, 125.9, 115.4, 122.7, 115.5, 118.5 y 99.6 mm desde diciembre del 2017 hasta junio del 2018.

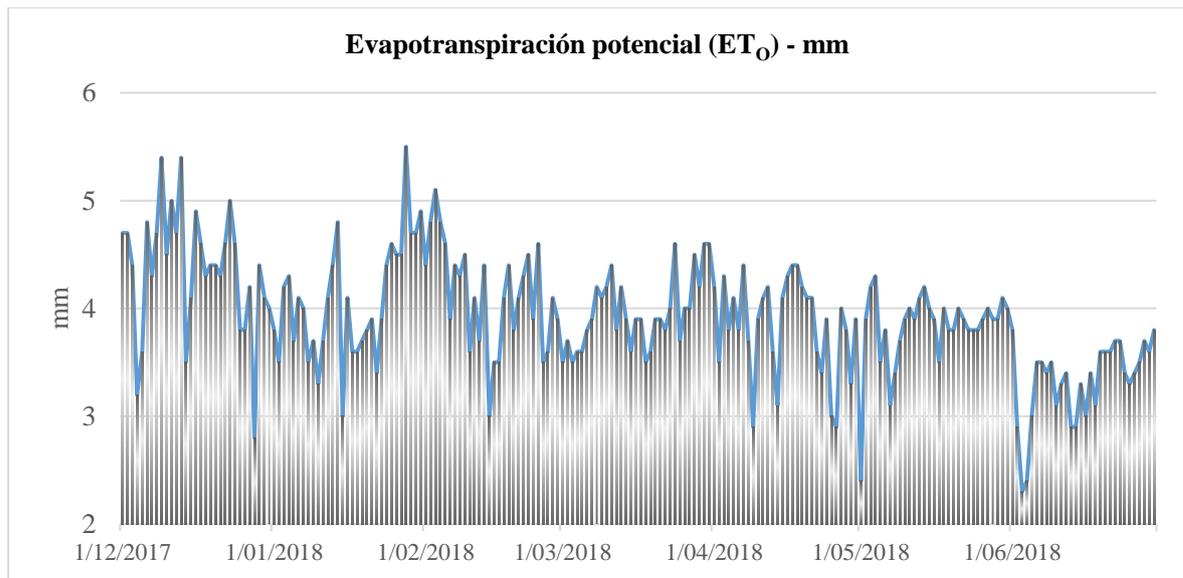


Figura 10: Evapotranspiración potencial registrada entre el 1/12/2017 y el 30/6/2018

3.5. Características de los fertilizantes y abonos

Como expuesto por Finck (1988), los fertilizantes o abonos minerales son una fuente de nutrientes para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, siendo clasificados por su composición o aporte de elementos. Fueron utilizados los siguientes fertilizantes y abonos:

- Urea: corresponde a la carbodiamida, su importancia ha crecido mundialmente al ser el fertilizante más sencillo de fabricar (Finck, 1988). Posee un contenido de nitrógeno de 46 %.
- Fosfato diamónico: es producido mediante la reacción de amoníaco y ácido fosfórico, siendo el fertilizante fosfórico más utilizado en el mundo y posee un contenido de nitrógeno de 18% y un 46% de fósforo en forma de P_2O_5 (India Department of Fertilizers, 2016).
- Cloruro de potasio: los fertilizantes potásicos se obtienen generalmente a partir de la trituración de sales potásicas (Finck, 1988). El cloruro de potasio posee un contenido de 60 % de K_2O .
- Guano de corral: a pesar de tener características muy variables, se compone principalmente de excremento y una pequeña parte de orina y paja. Sigue siendo uno de los abonos más importantes en muchas zonas agrícolas (Finck, 1988).
- Biol: abono orgánico líquido resultante de la mezcla de residuos orgánicos frescos y agua, fermentados mediante un proceso anaeróbico que dependiendo de la fuente de materias primas, aportará micro y macro nutrientes (Aguilar & Gomez, 2016; Aroca, 2015; Pinto & Quipuzco, 2015).

3.6. Otros

Fueron utilizados los siguientes equipos, herramientas y materiales: estación meteorológica Davis Vantage Vue, dron Spark DJI, trilladora mecánica, horno de secado, balanza, cámara fotográfica, lampa, pico, rastrillo, libreta de campo, lápiz, cinta métrica, bolsas de papel, plumón, bandejas, tijeras de poda, bolsas de papel.

3.7. Metodología

3.7.1. Factores en estudio

- Fertilización: se contempló evaluar el efecto del uso de fertilizantes y abonos que están al alcance de los productores en la localidad, estos fueron:
 - a Sin fertilización: es frecuente que el pequeño agricultor no haga uso de fertilizantes o utilice la fertilidad residual de campañas pasadas, para este

tratamiento no se aplicó forma alguna de fertilizante para simular el escenario descrito, a la vez que se utilizó a manera de testigo o control.

- b Fertilización mineral: utilizando los fertilizantes químicos urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio en una mezcla física aportando la cantidad de 100, 40 y 60 kg de N, K₂O y P₂O₅ por hectárea, se aplicó este tratamiento simulando condiciones de alta disponibilidad de nutrientes (Rosas Huaranga, 2015).
 - c Guano de corral: una fuente comúnmente utilizada y de amplia disponibilidad en el contexto rural agropecuario. Se trabajó aplicando el volumen correspondiente a diez toneladas por hectárea, recomendación local para aplicaciones en la zona de trabajo.
 - d Biol: abono orgánico líquido, posee la ventaja de una relativamente sencilla elaboración y aplicación, por lo que resulta una opción viable para mejorar los rendimientos en la producción agrícola rural. La concentración empleada fue de 10 %, haciendo aplicaciones en proporción a doscientos litros de mezcla por hectárea, aplicado durante tres veces a lo largo de la campaña: luego del aporque, durante formación de la panoja y al inicio del llenado de grano.
- Concentraciones de CO₂ atmosférico: para los escenarios proyectados se hizo uso de trayectorias de concentración representativa descritas en la sección 2.3.1. Se utilizaron las siguientes como factores de estudio:
- a RCP 4.5
 - b RCP 8.5
 - c CO₂ histórico
- Modelos de circulación global: son modelos matemáticos sobre la circulación atmosférica. Se tomó como factores a los tres modelos descritos en la sección 2.3.1.:
- a MPI-ESM-MR
 - b CANESM2
 - c CNRM-CM5

- Variedades de quinua: cada variedad cuenta con características génicas que la hacen única en cuanto a su respuesta e interacción con el ambiente, por ello cada una respondió de manera distinta a las condiciones del valle, la disponibilidad de agua y el tratamiento de fertilización que le fue dado. Las variedades utilizadas fueron las descritas en la sección 3.3.:

- a Amarilla Maranganí
- b Blanca de Junín
- c Rosada de Huancayo

3.7.2. Variables evaluadas

- Variables climáticas: Una estación meteorológica dispuesta en las instalaciones del IRD Sierra permitió la medición de las variables climáticas en la zona de estudio. La estación utilizada fue una Davis Vantage Vue. Los datos obtenidos por la estación fueron descargados de la estación haciendo uso de un registrador de datos automático.



Figura 11: Instalación de estación meteorológica en el IRD Sierra

- Altura de planta y profundidad de raíces: durante la campaña se extrajeron muestras con frecuencia mensual, teniendo siempre cuidado de no dañar el sistema radicular. Las

muestras fueron catalogadas y posteriormente, en las instalaciones del laboratorio del IRD Sierra, se realizó la medición de altura de planta y profundidad efectiva de raíces.

- Biomasa aérea: las muestras colectadas para la medición de altura de planta fueron, una vez realizadas las mediciones respectivas, llevadas a un horno a 70 °C durante 48 horas para medir posteriormente el peso seco de las muestras. Para la última evaluación, realizada durante la cosecha, se realizó el corte de un metro lineal para la evaluación de este parámetro.



Figura 12: Medición de altura de planta y profundidad de raíces

- Cobertura vegetal: se tomaron fotografías aéreas de vista vertical con frecuencia mensual para estimar la cobertura vegetal, las imágenes fueron seccionadas de forma que cada una correspondiera a una unidad experimental. Se calculó la cobertura vegetal haciendo uso de la aplicación Soil Analysis Pro versión 2.6 (Broken Oak Studios, 2017), el programa funciona mediante un algoritmo que segmenta cada imagen agrupando los píxeles hasta en veinte grupos según colorimetría y asignando un porcentaje a cada uno de ellos.

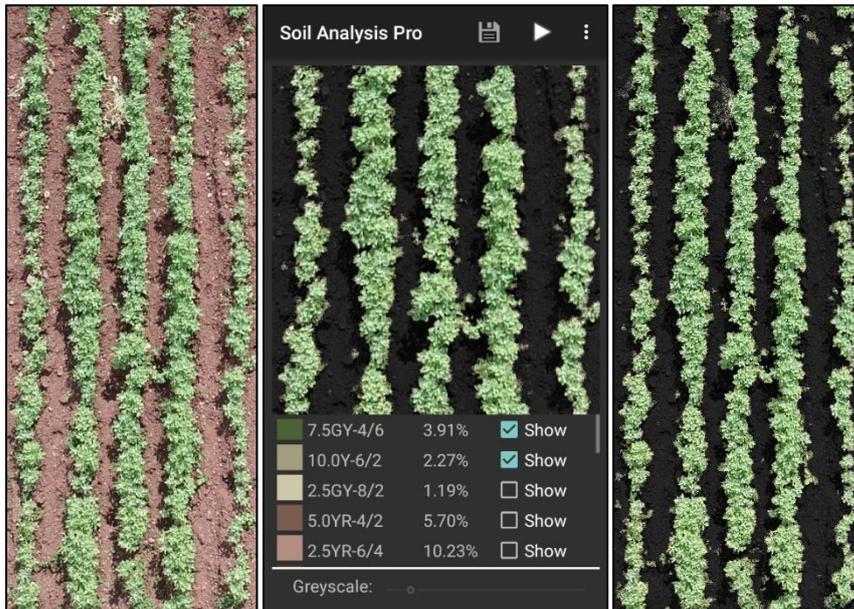


Figura 13: Imagen aérea y medición de cobertura vegetal

- Rendimiento: para la evaluación de rendimiento en campo se realizó el corte de cinco metros lineales para evaluar el rendimiento de grano al final de la campaña. Se hizo uso de una trilladora mecánica para la separación del grano y el resto de la planta, para luego ser pesado tanto en fresco como en seco. Para el rendimiento simulado, se realizó el registro una vez hecha la corrida en el modelo AquaCrop con los parámetros de estudio ingresados en la interfaz.



Figura 14: Trilladora mecánica y cosecha en campo experimental

3.7.3. Calibración del modelo AquaCrop

La calibración del modelo se basó en lo indicado por Hsiao *et al.* (2012) quienes señalan que el modelo, diseñado para ser utilizado en una amplitud de condiciones, ha sido ya parametrizado

para una gama de cultivos entre los cuales se encuentra la quinua. Los parámetros utilizados para la simulación se clasifican en dos grupos, parámetros conservativos y no conservativos. Los primeros, parámetros conservativos, agrupan aquellos que permanecen constantes bajo diferentes condiciones; el segundo grupo, parámetros no conservativos, agrupa parámetros que dependen de condiciones como clima, variedad y manejo del cultivo.

Para empezar con la calibración fue necesario definir el ambiente en el cual se desarrolló el cultivo con la entrada de los datos colectados necesarios para realizar las simulaciones iniciales. Se hizo uso del archivo default para quinua, *QUINUA.CRO*, como punto de partida para los ajustes correspondientes a cada variedad. Para realizar la calibración de las variedades se trabajó en base la información registrada de las evaluaciones en campo, correspondiente a la descritas en la sección 2.2.2. La práctica común en la refinación de los parámetros consiste en empezar con valores estimados comparando los resultados con los datos obtenidos en campo, para luego ajustarlos, ejecutar la simulación y repetir el proceso hasta que concuerde estrechamente con los datos experimentales (Steduto *et al.*, 2012).



Figura 15: Datos de entrada para el modelo AquaCrop

Fuente: Adaptado de Steduto *et al.* (2012)

Los ajustes iniciales se realizaron según observaciones de características de cada variedad hechas en campo correspondientes a la fenología, como el tiempo requerido para entrar en etapa de floración, duración de esta etapa, el inicio de senescencia y el ciclo de cultivo total. Ajustes en la densidad de siembra, tiempo para alcanzar el 90 % de emergencia, cobertura máxima de dosel y profundidad de raíces fueron llevados a cabo posteriormente. Estas observaciones fueron luego tabuladas para ser comparadas con las mismas variables simuladas por el modelo para las condiciones de suelo, clima y manejo ingresadas para la temporada de simulación correspondiente, donde se asumió que no hubo limitaciones por parte de la fertilidad del suelo al utilizar las observaciones del tratamiento de fertilización mineral como referencia para la calibración, verificando la coincidencia entre lo simulado y lo registrado en el campo experimental. Posteriormente se ajustaron parámetros relacionados al desarrollo y crecimiento del cultivo, como coeficientes de crecimiento y disminución de dosel; a la transpiración del cultivo; a la producción de biomasa y formación del fruto y el efecto del estrés hídrico.

3.7.4. Simulación de escenarios climáticos previstos

Para evaluar y comparar el comportamiento futuro del rendimiento de tres variedades de quinua bajo escenarios previstos de cambios en la precipitación, temperatura y concentraciones de CO₂ se realizaron simulaciones para los años 2015, 2016 y 2017, con referencia a condiciones actuales, y de los años 2049, 2050 y 2051 como referentes de escenarios futuros. Para las condiciones actuales se hizo uso de datos históricos registrados en la zona de estudio. Para simular las campañas en los años 2049, 2050 y 2051 se crearon seis archivos de clima combinando información de proyecciones de precipitación y temperatura correspondientes a los modelos de sistema de la tierra MPI-ESM-MR, CANESM2 y CNRM-CM5 con los escenarios de concentración representativa RCP 4.5 y RCP 8.5. Fueron utilizados los archivos calibrados de las tres variedades de quinua y los datos registrados del perfil de suelo del campo experimental para realizar estas simulaciones.

Con el fin de homogenizar el criterio de fecha de siembra, el día elegido para cada simulación fue el último de cuatro días consecutivos en los que se acumule un volumen de lluvia igual o mayor a 10 mm, confirmando el inicio de la temporada de lluvia, desde noviembre y hasta diciembre que es considerada la época de siembra para la zona (Aguilar & Gomez, 2016).

3.7.5. Diseño experimental

La naturaleza del experimento y la cantidad de variables utilizadas no permitieron trabajar mediante una aleatorización completa, haciendo necesario el uso de un diseño de parcelas divididas en bloques al azar, donde los factores de estudio más difíciles de cambiar son aplicados a parcelas o unidades experimentales grandes, mientras que el resto de factores se van asignando a parcelas más pequeñas (Montgomery, 2014). Este diseño permitió una mayor eficiencia en el uso de recursos y en la homogeneidad de resultados al distribuir el efecto de los factores principales al resto de unidades experimentales, reduciendo el área necesaria para el despliegue del experimento.

Tabla 7: Factores, niveles y claves usadas en diseño de parcelas divididas

Parcela		Subparcela	
Fertilización	Clave	Variedades	Clave
Sin fertilizante	FI	Amarilla Maranganí	VI
Fertilización mineral	FII	Blanca de Junín	VII
Guano de corral	FIII	Rosada de Huancayo	VIII
Biol	FIV		

El experimento consistió en la evaluación de biomasa y rendimiento de tres variedades de quinua bajo cuatro regímenes de fertilización. Para la instalación del campo experimental se asignó el factor fertilización a las parcelas y el factor variedad de quinua a las subparcelas, los bloques corresponden a franjas de siembra.

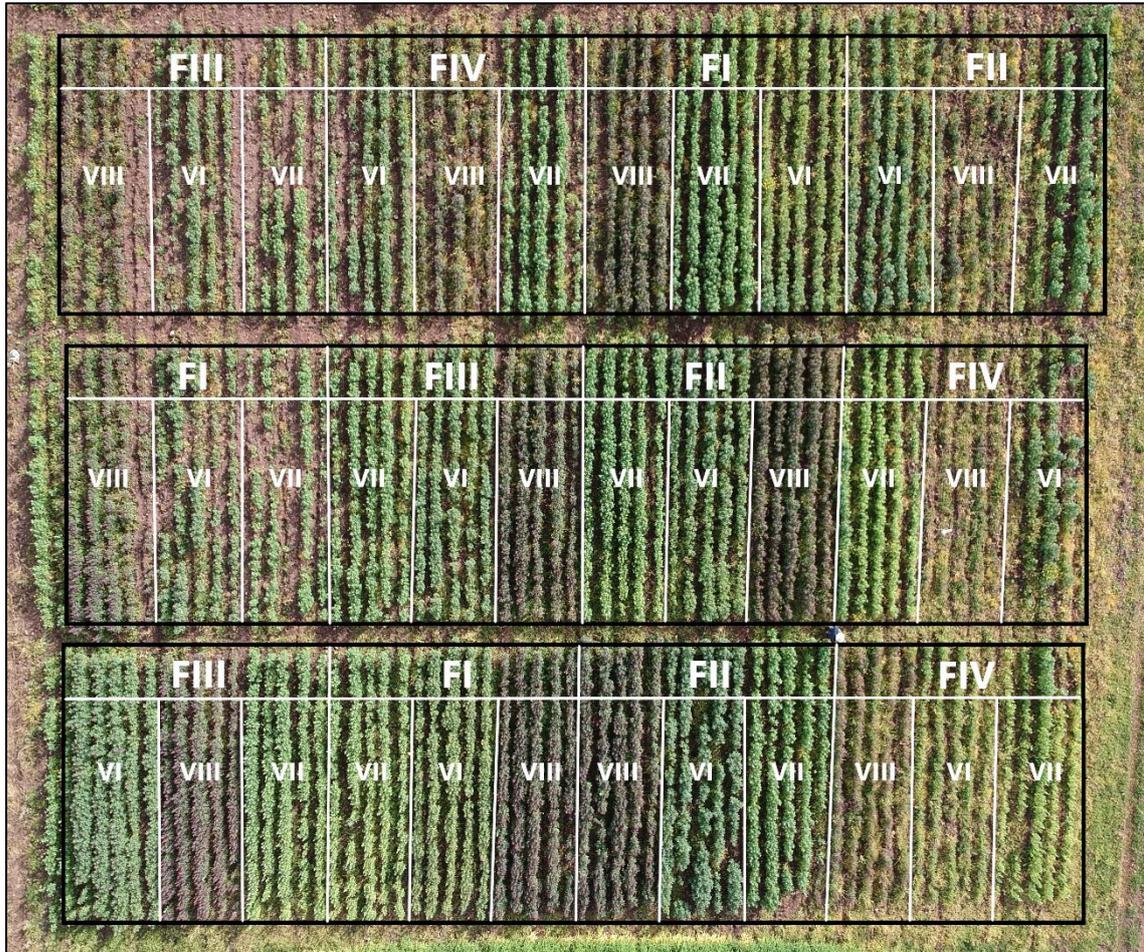


Figura 16: Distribución espacial de los tratamientos en parcelas divididas

En cada uno de los tres lotes sembrados se instalaron tres franjas en donde se distribuyeron de forma aleatoria los cuatro tratamientos de fertilización para asignar las parcelas, luego, se realizó la distribución aleatoria de las variedades correspondientes a cada subparcela constituida por cinco surcos de 10 m de largo con un distanciamiento de 0.8 m entre sí.



Figura 17: Lotes sembrados el 11 de diciembre del 2017

Como mencionado anteriormente el diseño experimental empleado fue el de parcelas divididas en bloques al azar, para ello los tratamientos se distribuyeron al azar como se muestra en la figura 16, distribución que fue replicada en los tres lotes cultivados. El modelo aditivo lineal de este diseño se expone a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + \gamma_k + \tau_i + (\gamma\tau)_{ki} + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} : es el valor observado de la variable respuesta en el i-ésimo nivel de tratamiento de fertilización, j-ésimo nivel de variedad en el k-ésimo bloque.

μ : es el efecto de la media general de la variable de respuesta.

γ_k : es el efecto del k-ésimo bloque.

τ_i : es el efecto del i-ésimo nivel de tratamiento de fertilización (parcela).

$(\gamma\tau)_{ki}$: es el efecto del error experimental del i-ésimo nivel de tratamiento de fertilización en el k-ésimo bloque, error (a).

β_j : es el efecto del j-ésimo nivel de variedad de quinua (subparcela).

$(\tau\beta)_{ij}$: es el efecto de la interacción bajo el i-ésimo nivel de tratamiento de fertilización y j-ésimo nivel de variedad de quinua.

ϵ_{ijk} : es el efecto del error experimental bajo el i-ésimo nivel de tratamiento de fertilización, j-ésimo nivel de variedad de quinua en el k-ésimo bloque, error (b).

Tabla 8: Fuentes de variación y grados de libertad del diseño de parcelas divididas

Fuente de variación	Grados de libertad
Bloques	8
Fertilización (A)	3
Error (a)	24
Variedad (B)	2
Interacción Fertilización x Variedad (AB)	6
Error (b)	64
Total	107

Los grados de libertad para cada componente de la fuente de variación del análisis de varianza son expuestos en la tabla 8. Se realizaron las comparaciones de medias mediante prueba de Tukey a un $\alpha = 0.05$ para determinar diferencias significativas en los promedios.

Para determinar la confiabilidad entre la simulación del modelo calibrado para las tres variedades de quinua con los datos observados se utilizaron los siguientes indicadores descrito por Raes *et al.* (2017) para el desempeño de AquaCrop:

- **Coefficiente de relación de Pearson (r)**: índice cuyos valores varían de -1 a 1, indica la dependencia lineal entre dos variables y es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$r = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=0}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]$$

Donde:

r: es el coeficiente de correlación de Pearson.

\bar{P} : es la media de valores simulados.

P_i : son los valores simulados.

\bar{O} : es la media de valores observados.

O_i : son los valores observados.

n: son los datos registrados.

- **Raíz del error cuadrático medio normalizado (CV(RMSE))**: la raíz del error cuadrático medio (RMSE) mide la magnitud media de la diferencia entre lo simulado y observado en las unidades de la observación. Los valores obtenidos varían del cero al infinito positivo, indicando un buen y mal desempeño respectivamente. Se calcula como expuesto a continuación:

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]}$$

Donde:

RMSE: es la raíz del error cuadrático medio.

P_i : son los valores simulados.

O_i : son los valores observados.

n : son los datos registrados.

La normalización de estos valores corresponde a la raíz del error cuadrático medio normalizado (CV(RMSE)) que, expresado en porcentaje, indica la diferencia relativa entre lo simulado y observado.

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{O}} \times \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]} \times 100$$

Donde:

CV(RMSE): es la raíz del error medio cuadrático normalizado en %.

P_i : son los valores simulados.

\bar{O} : es la media de valores observados.

O_i : son los valores observados.

n : son los datos registrados.

- **Coefficiente de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe (EF)**: coeficiente que indica el ajuste de los datos observados contra lo simulados con referencia una distribución lineal, comparando la varianza residual con la varianza de los datos observados. El coeficiente comprende valores del infinito negativo a la unidad. Es calculado haciendo uso de la siguiente ecuación:

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

Donde:

EF: es el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe.

P_i : son los valores simulados.

\bar{O} : es la media de valores observados.

O_i : son los valores observados.

- **Índice de acuerdo de Willmott (d)**: el índice mide el grado en que la data observada se ajusta a la data simulada o proyectada. Su valor de respuesta oscila entre cero y uno. Es determinado mediante la ecuación:

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

Donde:

D: es el índice de acuerdo de Willmott.

\bar{P} : es la media de valores simulados.

P_i : son los valores simulados.

\bar{O} : es la media de valores observados.

O_i : son los valores observados.

n: son los datos registrados.

Tabla 9: Indicadores estadísticos e interpretación de resultados sobre el modelamiento

Indicador estadístico				Interpretación
r	CV(RMSE)	EF	d	
≥ 0.90	$\leq 5\%$	≥ 0.80	≥ 0.90	Muy buena
0.80 - 0.89	6 - 15 %	0.60 - 0.79	0.80 - 0.89	Buena
0.70 - 0.79	16 - 25 %	0.40 - 0.59	0.65 - 0.79	Moderadamente buena
0.50 - 0.69	26 - 35 %	0 - 0.39	0.50 - 0.64	Moderadamente pobre
0 - 0.49	36 - 45 %	(-10) - 0	0.25 - 0.49	Pobre
< 0	$> 46\%$	$< (-10)$	< 0.25	Muy pobre

Adaptado de Raes *et al.* (2017)

La evaluación del comportamiento futuro del rendimiento de tres variedades de quinua bajo escenarios previstos de cambios en la precipitación, temperatura y concentraciones de CO₂ en el valle del Mantaro se analizó mediante un diseño factorial de tres factores con replicación.

Tabla 10: Factores, niveles y claves usadas en diseño factorial

Factores evaluados					
GCM	Clave	Concentración de CO ₂	Clave	Variedad	Clave
CANESM2	1	RCP 4.5	1	Blanca de Junín	VI
CNRM-CM5	2	RCP 8.5	2	Amarilla Maranganí	VII
MPI-ESM-MR	3	CO ₂ histórico	3	Rosada de Huancayo	VIII

Los factores evaluados con este diseño fueron los modelos de circulación general atmosférica; concentraciones de CO₂ mediante trayectorias de concentración representativa y el registro histórico de CO₂ y las tres variedades de quinua en estudio. El modelo aditivo línea de este modelo es:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl} : es el valor observado de la variable respuesta en el i-ésimo nivel de GCM, j-ésimo nivel de concentración de CO₂, en el k-ésimo nivel de variedad de quinua en la l-ésima repetición.

μ : es el efecto de la media general de la variable de respuesta.

τ_i : es el efecto del i-ésimo nivel de GCM.

β_j : es el efecto del j-ésimo nivel de i-ésimo nivel de concentración de CO₂.

γ_k : es el efecto del k-ésimo nivel de variedad de quinua.

$(\tau\beta)_{ij}$: es el efecto de la interacción del i-ésimo nivel de GCM y el j-ésimo nivel de concentración de CO₂

$(\tau\gamma)_{ik}$: es el efecto de la interacción del i-ésimo nivel de GCM bajo y el k-ésimo nivel de variedad de quinua.

$(\beta\gamma)_{jk}$: es el efecto de interacción del j-ésimo nivel de concentración de CO₂ bajo y el k-ésimo nivel de variedad de quinua.

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$: es el efecto de la interacción del i-ésimo nivel de GCM, el j-ésimo nivel de concentración de CO₂ y el k-ésimo nivel de variedad de quinua.

ϵ_{ijkl} : es el efecto del error experimental bajo el i-ésimo nivel de GCM, el j-ésimo nivel de concentración de CO₂ y el k-ésimo nivel de variedad de quinua en la l-ésima replicación.

Tabla 11: Fuentes de variación y grados de libertad del diseño factorial

Fuente de variación	Grados de libertad
GCM	2
Concentración de CO ₂	2
Variedad	2
GCM x Concentración de CO ₂	4
GCM x Variedad	4
Concentración de CO ₂ x Variedad	4
GCM x Concentración de CO ₂ x variedad	8
Error	54
Total	80

Los grados de libertad para cada componente de la fuente de variación del análisis de varianza son expuestos en la tabla 11. Para este caso las comparaciones de medias mediante prueba de Tukey se llevaron a cabo a un $\alpha = 0.01$ para determinar diferencias significativas.

Los análisis estadísticos fueron realizados haciendo uso de la versión 17.1.0 de Minitab 17 Statistical Software (2010).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Condiciones del experimento

4.1.1. Temperatura

Las temperaturas base y máxima para el desarrollo del cultivo en el modelo parametrizado del AquaCrop corresponden a 2 y 30 °C respectivamente. Steduto *et al.* (2012) señalan que la aparición foliar para quinua evaluada en diversas variedades, alturas y latitudes tuvo como promedio una temperatura base de 2 °C y un óptimo desarrollo a los 22 °C, mientras que otros estudios señalan como temperatura base 3 °C, óptima entre 30 y 35 °C y una máxima de 35 °C (Bertero, Kings, & Hall, 2000; Jacobsen & Bach, 1998). Aguilar y Gomez (2016) señalan que las ideales para su desarrollo se encuentran en el rango de 15 y 25 °C. Se observó durante el desarrollo de la campaña que no se alcanzaron las temperaturas límites exceptuando un breve periodo durante el mes de abril y luego durante el final de la campaña. La quinua puede tolerar heladas durante las fases de desarrollo vegetativo, formación de la inflorescencia y de forma posterior al estado de grano pastoso (Aguilar & Gomez, 2016), en consecuencia, la temperatura permitió un desarrollo regular en el cultivo durante la campaña evaluada. El descenso en la temperatura registrada durante el mes de abril coincidió con el estadio de grano pastoso, sin embargo, por lo antes indicado no afectó la producción.

4.1.2. Precipitación

La siembra se llevó a cabo el día 11 de diciembre del 2017 y a pesar de encontrarse dentro del rango temporal de fecha de siembra recomendado (Aguilar & Gomez, 2016), durante la última etapa del ciclo del cultivo se observó una disminución tanto en la frecuencia como intensidad de las lluvias, llevando esto a un déficit hídrico que afectó el desarrollo del cultivo. Las simulaciones evidenciaron como esta situación conllevó a una senescencia temprana y reducción en los rendimientos. La disponibilidad de agua para el cultivo está determinada en

gran medida determinado por el tipo de suelo y la profundidad de raíces, en la figura 18 podemos observar el balance hídrico en el perfil de suelo y como durante la última etapa de producción el contenido de agua disponible en la zona radicular no fue suficiente para cubrir la demanda de transpiración por parte del cultivo para ninguna de las tres variedades, reduciendo el rendimiento alcanzado. Sin embargo, como se verá en la sección 4.2, la respuesta bajo estas condiciones fue distinta en cada variedad.

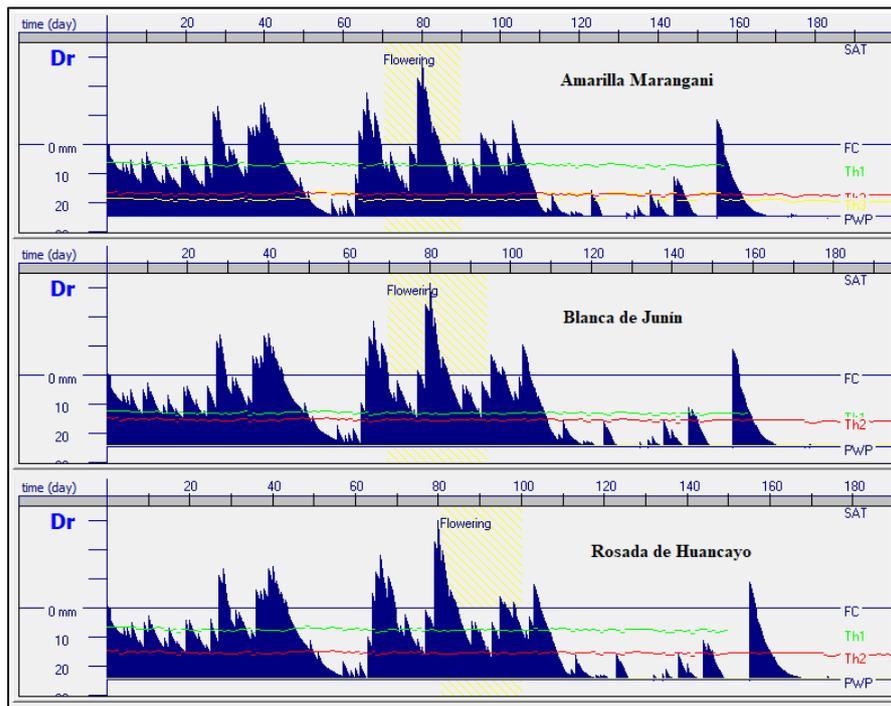


Figura 18: Simulación en AquaCrop del balance hídrico por variedad durante campaña experimental

4.1.3. Suelo

Los requerimientos del modelo están limitados a las propiedades del suelo que puedan afectar el balance hídrico durante la simulación. Los datos de textura, profundidad de cada estrato, capacidad de campo y punto de marchitez para la descripción del perfil del suelo fueron modificados de acuerdo a los análisis realizados. Estas características se observan en la figura 19. Las propiedades hidráulicas de cada estrato fueron determinadas extrapolando cualidades según la textura del suelo.

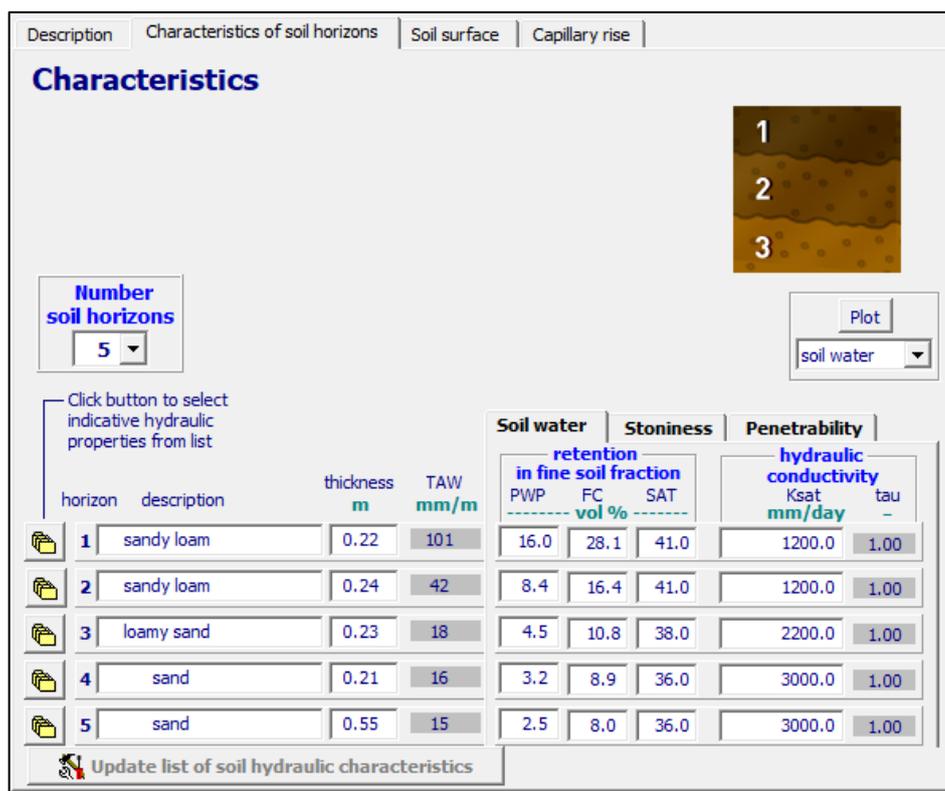


Figura 19: Modulo de características del perfil de suelo en AquaCrop

4.2. Variedades de quinua

Según lo indicado por Apaza *et al.* (2013) los rendimientos promedios para las variedades Amarilla Maranganí, Rosada de Huancayo y Blanca de Junín son 3.5, 2.8 y 2.5 t/ha respectivamente. El experimento demostró que la variedad Blanca de Junín obtuvo los mejores rendimientos frente a las otras dos variedades, a pesar de tener registrado el menor rendimiento promedio, mientras la variedad Rosada de Huancayo y la Amarilla de Maranganí no presentaron diferencias significativas. La tabla 12 muestra los rendimientos obtenidos para cada variedad bajo el tratamiento de fertilización mineral, que fue referenciado para la calibración del modelo, el rendimiento simulado con el AquaCrop para la campaña 2017/18, la media de rendimiento bajo los cuatro tratamientos de fertilización y la biomasa cosechada.

Tabla 12: Rendimientos de simulación en AquaCrop 2017/18, fertilización mineral, media de tratamientos de fertilización y producción de biomasa de las tres variedades de quinua

Variedad	Rendimiento simulado (t/ha)	Rendimiento fert. mineral (t/ha)	Media global (t/ha)	Biomasa cosechada (t/ha)
Blanca de Junín	2.50	2.50	1.66 (A)	5.9 (a)
Amarilla Maranganí	1.92	1.98	1.23 (B)	4.3 (b)
Rosada de Huancayo	1.68	1.67	1.05 (B)	3.5 (b)

El efecto del requerimiento hídrico no satisfecho durante las últimas etapas del cultivo afectó en distinta magnitud a cada variedad alterando factores como la expansión del dosel durante el desarrollo, la apertura y cierre estomático, inicio de senescencia y la acumulación de biomasa por parte del órgano cosechado, mientras que excesivos volúmenes de agua en el suelo pudieron haber generado estrés por falta de aireación en el sistema radicular (Asli & Neumann, 2009; Doorendos & Kassam, 1979; Hsiao, 1973). No se encontraron diferencias significativas en la profundidad radicular varietal evaluada durante la campaña.

Tabla 13: Profundidad radicular según variedad durante campaña 2017/18

Variedad	Profundidad radicular (cm)			
	1/03/2018	25/03/2018	28/04/2018	27/05/2018
Amarilla Maranganí	11.48	13.92	14.72	19.10
Blanca de Junín	10.98	13.36	14.76	17.77
Rosada de Huancayo	10.74	13.42	14.54	18.39

En la próxima figura se observa el comportamiento de la variedad Rosada de Huancayo durante la campaña. El déficit de agua disponible que se dio a partir del día 40, lo que redujo la producción de masa foliar alargando el periodo en que alcanzó la máxima cobertura. Es posible observar cómo cerca al día 100 un descenso en el agua disponible redujo la cantidad de agua transpirada por el cultivo y a pesar de no haberse visto inducida en una senescencia temprana, este periodo redujo la cantidad de biomasa potencial destinada al órgano cosechable. Por ello, a pesar de tener registros de mayores rendimientos, podemos asumir que el déficit hídrico se dio durante un periodo clave en la producción de grano afectando notablemente el rendimiento final.

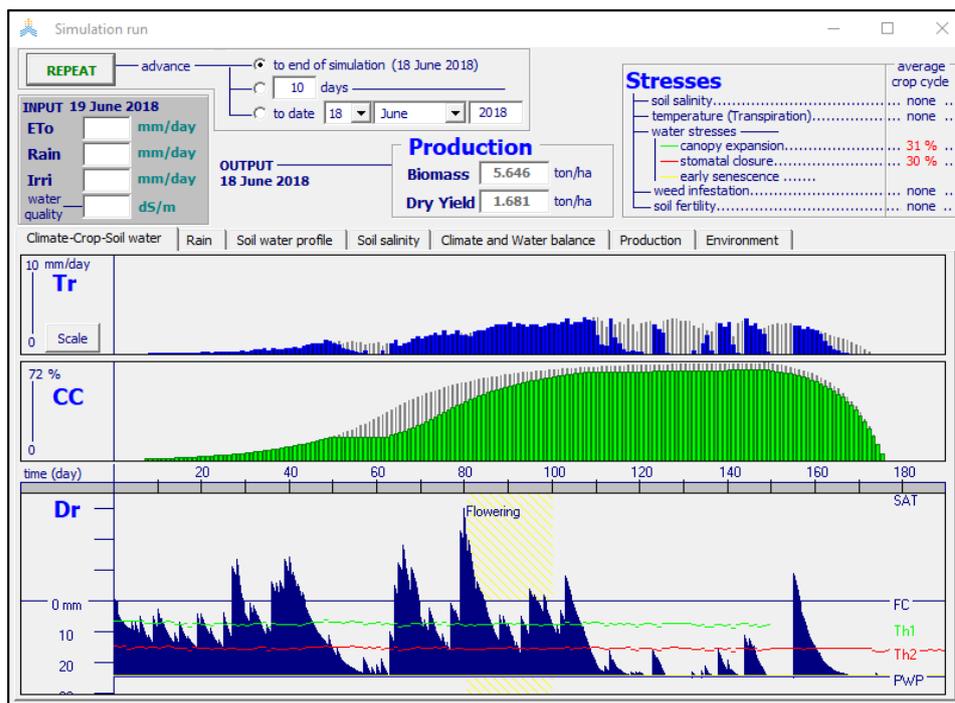


Figura 20: Simulación para la variedad Rosada de Huancayo, campaña 2017/18



Figura 21: Vista aérea de una subparcela variedad Rosada de Huancayo durante campaña 2017/18

La variedad Amarilla de Maranganí no fue la más productiva de las variedades como podría esperarse por su rendimiento promedio registrado. Se observó que, durante el desarrollo vegetativo inicial, el déficit hídrico dado a partir del día 40 redujo notablemente la producción

de cobertura vegetal durante el periodo de crecimiento exponencial alcanzando la máxima cobertura vegetal cerca de los 110 días. Es a partir de este momento donde, a causa de otro periodo con déficit hídrico, la cobertura vegetal empieza a reducirse consecuencia de una senescencia temprana causada por el estrés hídrico, como se observa en la figura 22. La variedad Amarilla Maranganí registra el mayor ciclo vegetativo de las tres variedades, por lo que la inducción a una senescencia temprana afecto notablemente la producción de biomasa cosechable, obteniendo cerca del 55 % del rendimiento potencial registrado para la variedad.

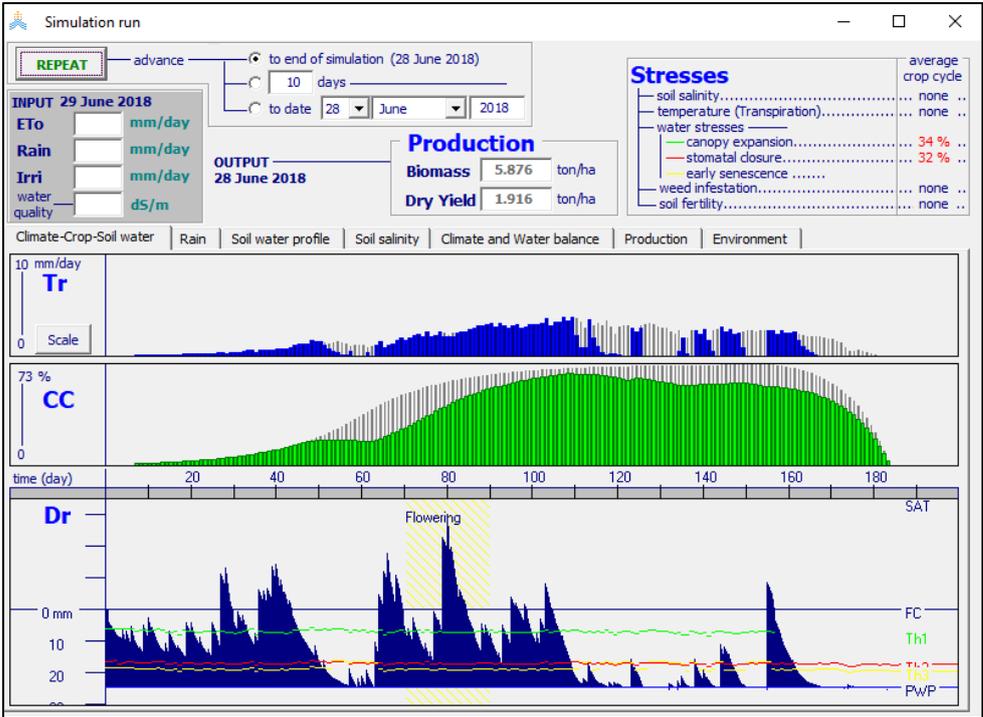


Figura 22: Simulación para la variedad Amarilla de Maranganí, campaña 2017/18



Figura 23: Vista aérea de una subparcela variedad Amarilla Maranganí durante campaña 2017/18

La variedad Blanca de Junín fue aquella que mostró un mejor comportamiento frente a las condiciones medioambientales durante la campaña, tanto para rendimiento como para producción de biomasa. El desarrollo de la cobertura se vio afectado alrededor del día 50, sin embargo, no se vio afectada en la misma magnitud que la variedad Amarilla Maranganí o Rosada de Huancayo. Esta variedad registra un ciclo vegetativo de duración similar a la observada en campo y a pesar de cosechar en grano un rendimiento cercano al promedio registrado de 2.5 t/ha, las condiciones no permitieron que el cultivo alcanzara su potencial real. La falta de agua disponible a partir del día 100 redujo la evapotranspiración que podría haber alcanzado el cultivo y con ello la producción de biomasa derivada para cosecha, por lo que en condiciones de riego complementario o exentas de estrés hídrico la variedad podría alcanzar un rendimiento mayor al indicado en la bibliografía.

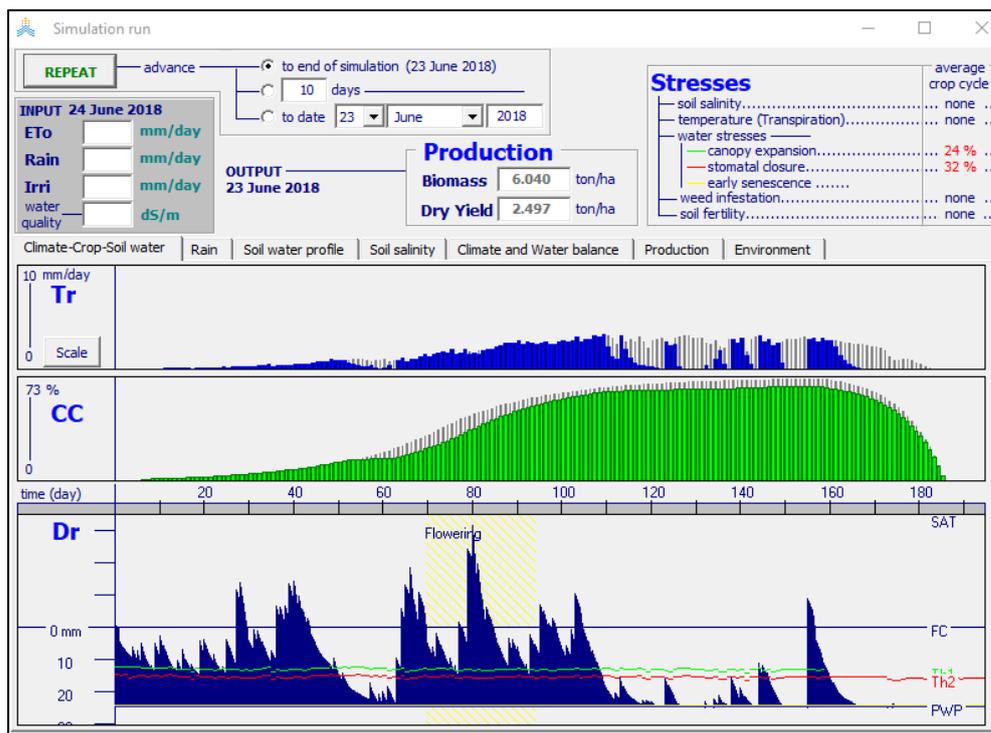


Figura 24: Simulación para la variedad Blanca de Junín, campaña 2017/18



Figura 25: Vista aérea de una subparcela variedad Blanca de Junín durante campaña 2017/18

4.3. Fertilización

El efecto de los tratamientos de fertilización en los parámetros evaluados puede explicarse por la influencia que tiene la disponibilidad de distintos nutrientes en un adecuado desarrollo y consecuentemente en el aprovechamiento del agua por parte del cultivo, siendo este el eje sobre el cual se desarrolla el modelo AquaCrop. La disponibilidad de nutrientes es vital para un adecuado desarrollo, tanto vegetativo como radicular, especialmente durante las primeras etapas fenológicas en donde, luego de un establecimiento en el campo, ocurre un crecimiento exponencial para alcanzar la máxima cobertura vegetal o cobertura de dosel, siendo este fenómeno visible en los gráficos de simulación para la cobertura vegetal.

Tabla 14: promedios de rendimiento en las tres variedades de quinua bajo los tratamientos de fertilización en estudio

Variedad de quinua	Tratamiento de fertilización				Media (t/ha)
	Fertilización mineral (t/ha)	Biol (t/ha)	Guano de corral (t/ha)	Sin fertilizante (t/ha)	
Blanca de Junín	2.50	1.90	1.34	0.91	1.66 (a)
Rosada de Huancayo	1.67	1.27	1.08	0.91	1.23 (b)
Amarilla Maranganí	1.98	1.03	0.67	0.50	1.05 (b)
Media (t/ha)	2.05 (A)	1.40 (B)	1.03 (BC)	0.77 (C)	1.31

Limitaciones en la disponibilidad de nutrientes causaron un desarrollo vegetativo más lento, siendo la menor tasa de crecimiento consecuente con la máxima cobertura de dosel alcanzada de manera tardía. Estas condiciones, en donde se afectó la capacidad del cultivo de alcanzar su potencial genético, causaron en una cobertura reducida, disminuyendo a su vez el potencial de evapotranspiración del cultivo y por ende el aprovechamiento del agua disponible. La menor cobertura vegetal expuso un mayor porcentaje de superficie de suelo durante las distintas etapas fenológicas en relación a un escenario sin limitantes, aumentando así la proporción de agua evaporada del suelo en relación a la transpirada por parte de la planta, afectando con ello la productividad del agua por parte del cultivo. Este efecto puede observarse en la producción de biomasa, siendo el tratamiento de fertilización mineral aquel que presentó la mayor producción de biomasa y rendimiento.

Tabla 15: Biomasa seca cosechada según factor de fertilización

Tratamiento de fertilización	Biomasa cosechada seca (t/ha)
Fertilización mineral	5.88 (a)
Biol	4.39 (b)
Guano de corral	4.29 (b)
Sin fertilización	3.78 (b)

El tratamiento sin fertilización no presentó diferencias significativas con las aplicaciones de biol y guano de corral para la producción de biomasa, ni con la aplicación de guano de corral para rendimiento. Se debe considerar que el aporte de nitrógeno otorgado por ambas fuentes y su influencia en la producción de área foliar (Chávez *et al.*, 2000; Escalante, 1999) haya generado un desbalance entre los órganos de pérdida y absorción de agua (Liu & Stützel, 2004). Esto explica por qué en las mediciones de biomasa en los tratamientos de biol y guano de corral no haya superado al tratamiento sin fertilizante. Durante el desarrollo de la investigación se evaluó la profundidad del sistema radicular, mas no su biomasa o extensión lateral, siendo la influencia positiva de los fertilizantes minerales sobre la producción de biomasa subterránea (Ostertag, 2001; Sayer *et al.*, 2012; Wright *et al.*, 2011) aquella que permitió un mayor aprovechamiento del agua en el perfil por parte de las plantas que recibieron este tratamiento, sin verse tan afectadas frente al estrés hídrico en relación a la producción de biomasa y rendimiento como las muestras del resto de tratamientos.

Tabla 16: Profundidad radicular según tratamiento de fertilización durante la campaña 2017/18

Tratamiento de fertilización	Profundidad radicular (cm)			
	1/03/2018	25/03/2018	28/04/2018	27/05/2018
Sin fertilización	11.59	13.66	15.58	18.15
Fertilización mineral	10.82	13.56	14.41	18.27
Guano de corral	11.21	13.17	14.32	18.08
Biol	10.63	13.89	14.73	18.92

Las diferencias del tratamiento de biol como fertilizante en comparación al guano de corral y sin fertilización fueron de 0.37 y 0.63 t/ha respectivamente, sin diferencias significativas frente al guano de corral, pero menor con respecto a la aplicación de fertilización mineral en 0.65 t/ha, con la cuál si se encontraron diferencias significativas. Dependiente a la producción de biomasa

total, el rendimiento productivo está sujeto al índice de cosecha y a la eficiencia en el uso del agua simulada en el modelo, sin embargo, el rol de los nutrientes no está ligado únicamente a la producción de biomasa sino a diversos procesos fisiológicos que al verse limitados por la falta de algún elemento esencial o condición desfavorable restringen el desarrollo del cultivo (Sinclair & Park, 1993), motivo por el cual se recomiendan fertilizaciones completas y no únicamente basadas en nitrógeno (Barrientos, 1993; Basantes, Lzao, & Obando, 2015).

La incorporación de guano de corral como fuente de nutrientes es una práctica realizada de forma muy tradicional por los agricultores, esto mejora no solo los niveles de fertilidad del suelo, pero mejora también las características físicas y químicas de este, sin embargo, para poder aportar nutrientes de forma efectiva la materia orgánica contenida en esa fuente debe mineralizarse para poder ser luego asimilable por la planta, empero, la temperatura de las regiones altoandinas reduce la tasa de mineralización de materia orgánica en comparación a regiones bajo condiciones de mayor temperatura. Tapia *et al.* (1979) indican que la quinua no utiliza tan eficientemente la aplicación de abonos orgánicos, sobre todo aplicados el mismo año de la siembra, utilizando de manera más eficiente la fertilización mineral.

Los requerimientos nutricionales de la quinua varían en cuanto fuente, momento y cantidad aplicada (Tobergte & Curtis, 2013). La aplicación foliar de biol como tratamiento de fertilización fue realizada en tres oportunidades, por ello, debe tomarse en consideración el efecto del fraccionamiento sobre el rendimiento de grano y la respuesta a las condiciones ambientales de la campaña, ya que este abono orgánico líquido tiene en su composición una variedad de nutrientes que incluye no solo minerales, sino también aminoácidos y compuestos orgánicos (Espinoza, 1987) que pueden haber favorecido la producción y sean la consecuencia de la semejanza de este tratamiento con la aplicación de guano de corral en cuanto a rendimiento, biomasa y la diferencia del mismo frente al tratamiento testigo sin fertilización.

4.4. Calibración del modelo

Una vez integrados los módulos de clima, suelo y manejo con las condiciones del campo experimental, se inició la calibración ingresando los datos de las observaciones de biomasa y cobertura vegetal registradas para las tres variedades de quinua en estudio. La tabulación de esta información acompañada de la fecha correspondiente, como se ve en la tabla 17, permitió

realizar la simulación inicial con el módulo integrado por defecto para quinua con la fecha de siembra del campo experimental.

Tabla 17: Observaciones de campo utilizadas para calibración en AquaCrop

Fecha	Amarilla de Maranganí		Rosada de Huancayo		Blanca de Junín	
	cobertura vegetal (%)	biomasa aérea (t/ha)	cobertura vegetal (%)	biomasa aérea (t/ha)	cobertura vegetal (%)	biomasa aérea (t/ha)
17/01/2018	8.70		7.60		9.50	
18/02/2018	32.90		28.80		32.30	
01/03/2018		1.45		1.92		0.87
25/03/2018	60.30	3.65	53.90	3.46	55.00	1.87
28/04/2018		4.16				4.60
29/04/2018	59.10		67.50		64.30	
27/05/2018		5.69		5.81		6.31

Posteriormente se realizaron los ajustes del modelo, para cada variedad, según lo descrito en la sección 3.7.3. Fue necesaria la simulación constante durante este proceso que, como indicado por Steduto *et al.* (2012), es un proceso de prueba y error. Los ajustes se llevaron a cabo en los módulos de desarrollo de cultivo (*crop development*), producción (*crop production*), evapotranspiración (*evapotranspiration*) y respuesta al estrés hídrico (*soil water stresses*). Los parámetros calibrados para cada una de las variedades en estudio, así como los fijados por defecto, son expuestos en la tabla 18.

Tabla 18: Parámetros de AquaCrop calibrados para las variedades de quinua en estudio

Parámetros de cultivo	Valor por defecto		Valor calibrado	
	<i>Quinoa.cro</i>	Rosada de Huancayo	Amarilla Maranganí	Blanca de Junín
Temperatura base (°C) por debajo de la cual el desarrollo del cultivo no progresa	2.00	2.00	2.00	2.00
Temperatura superior (°C) por encima de la cual el desarrollo del cultivo ya no aumenta con un aumento de la temperatura	30.00	30.00	30.00	30.00
Factor de agotamiento del agua del suelo para la expansión del dosel (p-exp) - Umbral superior	0.50	0.27	0.25	0.50

Factor de agotamiento del agua del suelo para la expansión del dosel (p-exp) - Umbral inferior	0.80	0.64	0.60	0.80
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel (0.0 = línea recta)	4.00	4.00	4.00	4.00
Fracción de agotamiento del agua del suelo para el control del estoma (p - sto) - Umbral superior	0.60	0.60	0.67	0.60
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para el control del estoma (0.0 = línea recta)	4.00	4.00	4.00	4.00
Factor de agotamiento del agua del suelo para la senescencia del dosel (p - sen) - Umbral superior	0.98	0.98	0.75	0.98
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la senescencia del dosel (0.0 = línea recta)	4.00	4.00	4.00	4.00
Factor de agotamiento del agua del suelo para la polinización (p - pol) - Umbral superior	0.85	0.98	0.85	0.85
Vol % para el punto anaerobiótico (* (SAT - [vol %]) en el que ocurre la aireación deficiente *)	10.00	10.00	10.00	10.00
Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo en el cual el cultivo comienza a verse afectado por la salinidad del suelo (dS / m)	5.00	5.00	5.00	5.00
Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo en el que el cultivo ya no puede crecer (dS/m)	18.00	18.00	18.00	18.00
Distorsión calibrada (%) de CC debido al estrés de salinidad (Rango: 0 (ninguno) a +100 (muy fuerte))	25.00	25.00	25.00	25.00
Respuesta calibrada (%) del estrés de estomas a EC _{sw} (Rango: 0 (ninguno) a +200 (extremo))	100.00	100.00	100.00	100.00
Coefficiente de cultivo cuando el dosel está completo, pero antes de la senescencia (KcTr, x)	1.10	1.10	1.10	1.00
Disminución del coeficiente de cultivo (%/día) como resultado del envejecimiento, deficiencia de nitrógeno, etc.	0.15	0.15	0.15	0.15
Profundidad mínima efectiva de enraizamiento (m)	0.30	0.30	0.30	0.30
Profundidad máxima efectiva de enraizamiento (m)	1.00	0.30	0.30	0.30
Factor de forma que describe la expansión de la zona raíz	15.00	15.00	15.00	15.00

Máxima extracción de agua de la raíz (m ³ water/ m ³ soil.day) en el cuarto superior de zona radicular	0.05	0.05	0.05	0.05
Máxima extracción de agua de la raíz (m ³ water / m ³ soil.day) en el cuarto inferior de zona radicular	0.01	0.01	0.01	0.01
Efecto de la cubierta del dosel en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa final de la temporada.	60.00	60.00	60.00	60.00
Superficie del suelo cubierta por una plántula individual al 90 % de emergencia (cm ²)	6.50	6.50	6.50	5.00
Tamaño del dosel de la planta individual (crecimiento) al primer día (cm ²)	6.50	6.50	6.50	5.00
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC): aumento de la cobertura del dosel (fracción de cobertura del suelo por día)	0.10	0.05	0.05	0.04
Cobertura máxima del dosel (CCx) en fracción de cobertura del suelo	0.75	0.72	0.73	0.73
Coefficiente de disminución del dosel (CDC): disminución de la cubierta del dosel (en fracción por día)	0.10	0.10	0.10	0.10
Días calendario: desde la siembra hasta la emergencia	7.00	7.00	7.00	6.00
Días calendario: desde la siembra hasta la profundidad máxima de enraizamiento	83.00	83.00	83.00	82.00
Días calendario: desde la siembra hasta la senescencia	160.00	150.00	157.00	159.00
Días calendario: desde la siembra hasta la madurez (duración del ciclo de cultivo)	180.00	190.00	200.00	195.00
Días calendario: desde la siembra hasta la floración	70.00	80.00	70.00	69.00
Duración de la etapa de floración (días)	20.00	20.00	20.00	25.00
Determinación de cultivos sin vinculación con floración	0.00	0.00	0.00	0.00
Exceso de frutos potenciales (%)	50.00	50.00	50.00	50.00
Construcción del índice de cosecha a partir de la floración (días)	90.00	90.00	110.00	106.00
Productividad del agua normalizada para ETo y CO ₂ (WP *) (gramo / m ²)	10.50	12.00	10.80	11.50
Productividad del agua normalizada para ETo y CO ₂ durante la formación del rendimiento (como % WP *)	90.00	55.00	80.00	90.00
Rendimiento del cultivo bajo concentración elevada de CO ₂ atmosférico (%)	50.00	50.00	50.00	50.00

Índice de cosecha de referencia (HIo) (%)	50.00	37.00	43.00	50.00
Coeficiente que describe el impacto negativo en el HI del cierre estomático durante la formación del rendimiento	9.00	5.00	10.00	9.00

Los factores de agotamiento hacen referencia a la fracción de agua disponible en la zona radicular que debe agotarse para para alterar algún parámetro de crecimiento. Los umbrales superiores indican el porcentaje de agua disponible que debe agotarse para que el factor en cuestión se empiece a ver limitado; los umbrales inferiores indican el porcentaje que, una vez agotado, anulará el proceso relacionado al factor asignado. Variaciones en las variedades Rosada de Huancayo y Blanca de Junín de estos factores para la expansión de dosel se dio tanto en los límites superiores como inferiores y para el límite superior de cierre estomático y el límite superior del inicio de senescencia en la variedad Blanca de Junín, evidenciando la resiliencia de la variedad Amarilla de Maranganí para no limitar su desarrollo bajo limitaciones moderadas de estrés hídrico. Esta última variedad, sin embargo, registró el menor coeficiente de crecimiento de dosel, ajustado a 0.04 en comparación a las otras dos variedades con un coeficiente de 0.05, que representa la fracción de suelo diaria cubierta por el dosel en crecimiento. Esta diferencia con el coeficiente de crecimiento de dosel por defecto, que registra un valor de 0.10, puede deberse en gran medida a que la temperatura media durante el ciclo no superó los 15 °C, temperatura que Aguilar y Gomez (2016) indican como límite inferior del rango óptimo de crecimiento y desarrollo para el cultivo que varía entre 15 y 25 °C.

Los límites calibrados para la profundidad radicular máxima se vieron reducidos en 70 cm para las tres variedades que se calibraron con valores de 30 cm, correspondiente al límite inferior disponible para este criterio. Las observaciones de profundidad radicular alcanzaron un promedio máximo de 18.92 cm, siendo el efecto de los modificadores texturales que en el programa se registran como porcentaje, no tomados en cuenta para la caracterización de estos. Limitaciones físicas en el desarrollo radicular causadas por las gravillas y gravas redondeadas encontradas en el perfil pueden haber afectado el crecimiento normal de este órgano para las variedades descritas en campo, limitando el volumen de la cabellera radicular en mayor profundidad derivando, consecuentemente, en los indicadores para la tasa de crecimiento radicular para las variedades en estudio.

Las observaciones de la fenología durante la campaña permitieron modificar parámetros relacionados para la calibración de las variedades en estudio. Los parámetros de días calendario hasta la emergencia y máximo desarrollo radicular fueron modificados para la variedad Blanca de Junín en 6 y 82 días respectivamente, sin variación en las variedades Rosada de Huancayo y Amarilla Maranganí frente a los valores por defecto de 7 y 83 días para ambas variables. Los días desde la siembra hasta la senescencia y madurez se calibraron en 150, 157, 159 y 190, 200 y 195 para las variedades Rosada de Huancayo, Amarilla Maranganí y Blanca de Junín respectivamente, variando de los 160 y 180 días registrados por defecto, siendo los efectos de la reducida precipitación, y con ello el agua disponible, durante las últimas etapas del ciclo los que incidieron sobre la senescencia y la calibración de esta variable. Se modificó también la duración en la etapa de floración de la variedad Blanca de Junín a 25 días frente al valor por defecto de 20 días que se mantuvo para el resto de variedades en estudio. El ajuste de los días calendario de la siembra hasta la madurez fueron superiores al determinado por defecto de 180, calibrándose en 190, 200 y 195 días para las variedades Rosada de Huancayo, Amarilla Maranganí y Blanca de Junín respectivamente, variando de los 170 días y el intervalo de 160 a 180 días reportados para las variedades Rosada de Huancayo y Blanca de Junín, mientras la variedad Amarilla Maranganí coincidió con el reporte de entre 190 y 210 días. A pesar de las modificaciones, se mantuvo la tendencia en cuanto al periodo de duración del ciclo vegetativo, siendo las variedades Amarilla de Maranganí y Rosada de Huancayo las de mayor y menor ciclo respectivamente.

Durante la calibración se vieron afectados también los parámetros de productividad del agua. La productividad del agua como referente global, tiene por defecto un valor de 10.5 g/m^2 para el cultivo de quinua. Los ajustes en este parámetro correspondieron a la evolución de la biomasa en relación al agua evapotranspirada y la concentración de CO_2 en el ambiente, observándose una mayor eficiencia para este parámetro en la variedad Rosada de Huancayo con un valor de 12 g/m^2 , seguido por la Amarilla Maranganí y Blanca de Junín con 11.5 y 10.80 g/m^2 respectivamente. La productividad del agua asignada durante la formación del rendimiento, con un valor por defecto de 90 %, se mantuvo sin modificaciones para la variedad Blanca de Junín, ajustándose a 80 y 55 % para las variedades Amarilla Maranganí y Rosada de Huancayo respectivamente. La relación de ambos parámetros explicaría por qué a pesar registrar el mayor valor de productividad de agua global, la variedad Rosada de Huancayo no alcanzó los mayores rendimientos.

La exactitud de la calibración fue comprobada mediante el módulo de análisis integrado en AquaCrop que permitió, una vez realizada la calibración, comparar los datos observados contra la simulación hecha por el modelo haciendo uso de los indicadores expuestos en la sección 3.8. Los resultados son expuestos en la tabla 19.

Tabla 19: Indicadores de análisis de la calibración

Variedad	Rosada de Huancayo		Amarilla de Maranganí		Blanca de Junín	
	Cobertura	Biomasa	Cobertura	Biomasa	Cobertura	Biomasa
Coeficiente de correlación de Pearson (r)	0.98	0.99	0.98	0.99	0.98	0.97
CV(RMSE) (%)	12.50	7.50	9.90	10.30	13.50	23.90
Coeficiente de Eficiencia del modelo (EF)	0.95	0.97	0.96	0.94	0.93	0.86
Índice de acuerdo (d)	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.95

La raíz del error cuadrático medio normalizado, que determina la magnitud del error entre los valores observados y simulados, indica una buena calibración para la producción de cobertura y biomasa en las tres variedades, a excepción de la producción de biomasa para la variedad Blanca de Junín cuyo valor se interpreta como moderadamente buena. La interpretación del coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de eficiencia del modelo y el índice de acuerdo; que permiten analizar la relación lineal, proporcionalidad y acuerdo entre los datos observados y simulados respectivamente; fue muy buena para la producción de biomasa y cobertura vegetal para las variedades Rosada de Huancayo, Amarilla Maranganí y Blanca de Junín.

4.5. Respuesta del rendimiento bajo escenarios climáticos proyectados

Estas simulaciones permitieron evaluar la respuesta de las tres variedades de quinua a posibles escenarios climáticos a presentarse al año 2050. Al darse variabilidad entre distintas campañas, se trabajó con el promedio de rendimientos proyectado para los años 2049, 2050 y 2051 frente a rendimientos simulados por el modelo para las campañas del 2015, 2016 y 2017, todas bajo un mismo criterio de siembra determinado por la acumulación de 10 mm de precipitación durante un periodo de cuatro días desde el mes de noviembre de cada año, acontecimiento que

determinaría el inicio de la temporada de lluvias en el intervalo de tiempo correspondiente a la época de siembra en la zona de estudio.

Tabla 20: Comparación de medias de rendimiento simulado bajo escenarios de concentraciones de CO₂ proyectados e históricos.

RCP	Media (t/ha)
4.5	4.6 (a)
8.5	4.6 (a)
Histórico	3.7 (b)

Los escenarios proyectados para el cambio climático utilizados para la proyección de rendimiento contemplan los RCP 4.5 y 8.5. Mientras que el RCP 4.5 supone un aumento controlado en la concentración de CO₂ ambiental para luego estabilizarse, el escenario RCP 8.5 supone una alta concentración de este gas con el paso del tiempo, a pesar de ello, no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento simulado proyectado al 2050 al comparando ambos RCP, pero sí de ambos escenarios frente a la simulación bajo condiciones de data histórica, como expuesto en la tabla 20. En ambos casos, RCP 4.5 y 8.5, la concentración de CO₂ será mayor a las registradas actualmente.

Tabla 21: Comparación de medias de rendimiento simulado bajo escenarios de GCM proyectados

GCM	Media (t/ha)
CNRM-CM5	4.5 (a)
MPI-ESM-MR	4.4 (ab)
CANESM2	4.1 (b)

La comparación entre medias de rendimiento obtenidas bajo los factores de GCM evidenciaron diferencias significativas para los escenarios simulados con los GCM CNRM-CM5 y CANESM2, sin existir diferencia significativa del GCM MPI-ESM-MR con los dos antes mencionados.

Tabla 22: Comparación de medias de rendimiento simulado bajo escenarios históricos y proyectados para las variedades de quinua en estudio

Variedad	Media (t/ha)
Blanca de Junín	5.2 (a)
Amarilla de Maranganí	4.4 (b)
Rosada de Huancayo	3.4 (b)

La variedad Blanca de Junín fue aquella que presentó el mayor rendimiento promedio para los escenarios comparados, seguido por la variedad Amarilla de Maranganí y Rosada de Huancayo respectivamente, siendo la Blanca de Junín la única en presentar diferencias significativas al resto de variedades. Estos resultados coinciden con las comparaciones realizadas tanto para la simulación del año experimental, como para los resultados obtenidos en campo para el tratamiento de fertilización usado de referencia para la simulación y la comparación de rendimiento de las tres variedades, siendo la variedad Blanca de Junín aquella que manifestó mejores resultados en cuanto a rendimiento tanto para las condiciones actuales como para los escenarios futuros simulados en condiciones del valle de Mantaro.

Tabla 23: Comparación de medias de rendimiento bajo escenarios simulados de RCP, GCM y datos históricos

GCM	RCP	Media (t/ha)
MPI-ESM-MR	8.5	4.9 (a)
CNRM-CM5	8.5	4.9 (a)
CNRM-CM5	4.5	4.9 (a)
CANESM2	4.5	4.6 (ab)
MPI-ESM-MR	4.5	4.4 (abc)
CANESM2	8.5	3.9 (bc)
Histórico	Histórico	3.7 (c)

Los resultados de la comparación de medias de rendimiento obtenido en las simulaciones bajo los factores de escenarios climáticos y concentraciones de CO₂ permitieron observar diferencias significativas entre los rendimientos simulados para escenarios proyectados y los rendimientos simulados para el escenario actual haciendo uso de datos históricos, siendo las condiciones actuales aquellas en donde se alcanzó el menor rendimiento. Fueron los escenarios combinados

de 8.5/CANESM2 y 4.5/MPI-ESM-MR aquellos que no presentaron diferencias significativas con los rendimientos para condiciones actuales, sin embargo, las agrupaciones superiores excluyen al rendimiento simulado para las condiciones actuales.

Tabla 24: Rendimientos promedio de simulación para las variedades de quinua en estudio bajo factores de RCP y GCM en evaluación

RCP	GCM	Variedad	Rendimiento (t/ha)
4.5	CANESM2	Blanca de Junín	5.62
		Amarilla Maranganí	4.44
		Rosada de Huancayo	3.73
	CNRM-CM5	Blanca de Junín	5.77
		Amarilla Maranganí	5.07
		Rosada de Huancayo	3.73
	MPI-ESM-MR	Blanca de Junín	5.43
		Amarilla Maranganí	4.37
		Rosada de Huancayo	3.43
8.5	CANESM2	Blanca de Junín	4.63
		Amarilla Maranganí	3.79
		Rosada de Huancayo	3.23
	CNRM-CM5	Blanca de Junín	5.94
		Amarilla Maranganí	5.03
		Rosada de Huancayo	3.65
	MPI-ESM-MR	Blanca de Junín	5.76
		Amarilla Maranganí	5.20
		Rosada de Huancayo	3.87

Los parámetros de precipitación, temperatura y concentración ambiental de CO₂ influyeron en el proceso de crecimiento y desarrollo vegetal a través de las tasas fotosíntesis y de transpiración. La fuente de carbono utilizada para la producción de biomasa vegetal es el CO₂, componente que es absorbido a través de las estomas para realizar la fotosíntesis disociando el CO₂ para utilizar el carbono en la formación de estructuras carbonatadas con diversos fines. La superioridad de los tratamientos simulados bajo una mayor concentración de CO₂ permitió observar cómo los procesos mencionados se verán beneficiados no solo por el incremento en la concentración de CO₂ sino también por el aumento en la temperatura que, dentro de los rangos

de desarrollo normal de un organismo, aceleran sus procesos químicos y biológicos mejorando con ello los rendimientos en comparación a las condiciones presentes para la quinua.

A pesar de los resultados favorables para los escenarios proyectados de cambios en la temperatura, precipitación y concentración ambiental de CO₂ bajo condiciones de secano, el cambio climático implica una irregularidad en la frecuencia de eventos como la precipitación (Bony *et al.*, 2006) donde será necesario planificar acciones con el fin de obtener mejores rendimientos, siendo importante el uso de modelos como AquaCrop para la toma de decisiones que permitirán trabajar con estrategias para hacer un uso más eficiente del recurso hídrico.

V. CONCLUSIONES

- La aplicación de fertilizante mineral aumentó significativamente el rendimiento y producción de biomasa de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en comparación a la aplicación de biol, guano de corral y ninguna aplicación en las variedades Blanca de Junín, Rosada de Huancayo y Amarilla Maranganí.
- La aplicación de biol aumentó significativamente los rendimientos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en comparación al testigo sin aplicación.
- La variedad Blanca de Junín fue superior a las variedades Rosada de Huancayo y Amarilla de Maranganí en rendimiento y producción de biomasa.
- El modelo AquaCrop, una vez calibrado, simuló satisfactoriamente el comportamiento de las variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en estudio.
- La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) se adaptará favorablemente a los escenarios proyectados de precipitación, temperatura y concentración ambiental de CO₂.
- La variedad Blanca de Junín obtendrá rendimientos significativamente superiores a las variedades Rosada de Huancayo y Amarilla Maranganí bajo los escenarios proyectados de precipitación, temperatura y concentración ambiental de CO₂.

VI. RECOMENDACIONES

- Se establecieron en el campo experimental un total de 108 subparcelas, limitando la superficie por unidad experimental. En caso de realizar la calibración de una única variedad se recomienda aumentar el tamaño de la unidad experimental para realizar las extracciones de muestras para la evaluación de parámetros como biomasa y profundidad radicular seleccionando un área representativa del campo en lugar de tomar muestras por número de plantas, como fue realizado para este experimento, con el fin de reducir la variabilidad en posteriores estudios en donde se lleve a cabo la siembra mediante el método de chorro continuo, como se acostumbra en el cultivo de quinua.
- Se recomienda, en caso no se disponga de sistemas de riego que permitan suplir la demanda hídrica durante la campaña, se trabaje con diferentes fechas de siembra adicionando, por ejemplo, siembras al inicio y final de la temporada de lluvias en la localidad de estudio con el fin de evaluar el efecto de distintos regímenes hídricos durante todo el ciclo vegetativo del cultivo. Esto permitiría disponer de mayor información sobre el comportamiento de las especies en estudio bajo diversos regímenes hídricos, además de poner a prueba estrategias aplicables a productores con limitado acceso a tecnología de mitigar el riesgo de pérdidas por eventos climáticos imprevistos o intervalos temporales sin precipitación durante periodos críticos para la formación del rendimiento.
- Habiéndose determinado el efecto positivo de la fertilización mineral sobre el rendimiento en el cultivo de quinua, se recomienda la realización de futuras investigaciones para determinar la dosis y momento óptimo de aplicación de fertilizantes minerales para el cultivo de quinua en el valle del Mantaro con el fin de evaluar su relación con el aprovechamiento del agua disponible, mejorar la eficiencia en el uso de recursos destinados al cultivo y la rentabilidad de la quinua para los productores del valle Mantaro.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abugoch, L. E., Augustin, M. A., Chen, F., Falcone, P., Giudici, P., Gullo, M., ... Yin, J. (2009). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): composition, chemistry, nutritional, and functional properties. *Advances in food and nutrition research*, 58, 1–31. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(09\)58001-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1043-4526(09)58001-1)
- Aguilar, E., & Gomez, L. (2016). *Guía de cultivo de la quinua*. (Universidad Nacional Agraria La Molina, Ed.) (Segunda Ed). Lima, Perú: Programa de investigación y proyección social de cereales y granos nativos.
- Akumaga, U., Tarhule, A., & Yusuf, A. A. (2017). Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, west Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.011>
- Alvarez, M., & von Rütte, S. (1990). Fertilización. En C. Wahli (Ed.), *Quinua hacia su cultivo comercial* (pp. 107–116). Quito, Ecuador: Latinreco S.A.
- Andrade, F. (1998). ¿Es posible satisfacer la creciente demanda de alimentos de la humanidad? *Interciencia*, 23(5), 266–274.
- Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R., & Pinedo, R. (2013). *Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú*. (G. Tejada, Ed.). Lima, Perú: JB grafic E.I.R.L.
- Aroca, R. L. (2015). Utilización del cibe-biol en el control de *Moniliophthora* sp . en cacao fino de aroma en Ecuador. *Proteccion vegetal*, 30, 88.
- Arroyo, J. (2011). Tendencias y cambio del clima del valle del Mantaro mediante los análisis de índices de precipitación efectiva y temperatura eficiente. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 01(01), 45–54.
- Asli, S., & Neumann, P. M. (2009). Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant, cell & environment*, 32(5), 577–584. <https://doi.org/10.1111/j.1365->

3040.2009.01952.x

- Azcon-Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal*. (M. Alvarez, Ed.) (Segunda Ed). Madrid, España: McGraw-Hill - Interamericana de España, S.L.
- Barrientos, E. (1993). *Aplicación de diferentes niveles de fertilizantes foliares en el cultivo de la quinua (Chenopodium Quinoa Willd.)*. Tesis Ing. Agr. Universidad Técnica de Oruro.
- Basantes, E., Lzao, D., & Obando, D. (2015). Extracción del nitrógeno y calcio en dos variedades quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), El Prado-Sangolquí. *Revista Congreso de ciencia y tecnología*, 10(1), 5–10.
- Bertero, H. D., Kings, R. W., & Hall, A. J. (2000). Photoperiod and temperature effects on the rate of leaf appearance in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Australian journal of plant physiology*, 27(4), 349–356.
- Broken Oak Studios. (2017). Soil Analysis Pro (version 2.6) [Aplicación móvil]. Descargado de: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.soil.analysis.pro>
- Bony, S., Colman, R., Kattsov, V., Allan, R., Bretherton, C., Dufresme, J.-L., ... Webb, M. (2006). How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *Journal of Climate*, 19(15), 3445–3480. [https://doi.org/10.1016/0378-4274\(82\)90077-7](https://doi.org/10.1016/0378-4274(82)90077-7)
- Bord, R. J., O'Connor, R. E., & Fisher, A. (2000). In what sense does the public need to understand global climate change? *Public understanding of science*, 9(3), 205–218. <https://doi.org/10.1088/0963-6625/9/3/301>
- Camarena. (2016). Prólogo. En *La Quinoa en el Perú. Tecnología, economía, mercados*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chávez, L. T., Agustín, A., Lagunas, M., & Román, C. (2000). Effect of nitrogen application and population density on sunflower growth and biomass distribution in hot climates. *Terra Latinoamericana*, 18(4), 313–323.
- Cleves, J. A., Toro, J., & Martínez, L. F. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista colombiana de ciencias hortícolas*, 10(1), 149–163. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4460>
- Departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA). (2014). *Claves para la taxonomía de suelos*. Recuperado de

http://www.mdp.edu.ar/agrarias/grado/723_Genesis/archivos/Taxonomia_Suelos_2010.pdf

Deza, D. (2018). *Rendimiento de la quinua (Chenopodium quinoa Willd.) con dos densidades de siembra y dos sistemas de fertilización en condiciones de La Molina*. Tesis Ing. Agr. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Doorendos, J., & Kassam, A. (1979). Yield response to water. *Irrigation and drainage*, 33(1), 193.

Dore, M. H. I. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International*, 31(8), 1167–1181.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.004>

Escalante, A. (1999). Area foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, 17(2), 149–157.

Espinoza, G. (1987). *Composición del biol en base a estiércoles y algas*. Continental SA: Arequipa. Tesis. Ing. Agr. Universidad Nacional San Agustín.

FAO. (2017). *Recomendaciones de política pública para enfrentar el cambio climático y la vulnerabilidad de la seguridad alimentaria*. Lima. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i7420s.pdf>

Fereres, E., Walker, S., Heng, L., Hisao, T., Steduto, P., Raes, D., ... Asseng, S. (2012). Aplicaciones de AquaCrop. En *Respuesta del rendimientos de los cultivos al agua* (pp. 53–71). Roma.

Finck, A. (1988). *Fertilizantes y fertilización*. (Reverte, Ed.). Editorial Reverté, S.A.

García-Vila, M., & Fereres, E. (2012). Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European journal of agronomy*, 36(1), 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.08.003>

García, G. (1985). Situación actual de la quinua. En *Curso de quinua, nivel técnicos* (pp. 1–8). Quito, Ecuador: INIAP, Estación experimental Santa Catalina.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>

- George, E. A., Tiwari, G., Yadav, R. N., Peters, E., & Sadana, S. (2013). UAV systems for parameter identification in agriculture. *2013 IEEE Global humanitarian technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)*, 270–273. <https://doi.org/10.1109/GHTC-SAS.2013.6629929>
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., ... Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Grenzdörffer, G. J., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The Photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 32(B1), 1207–2014. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.41.4.287>
- Habtemariam, L. T., Abate Kassa, G., & Gandorfer, M. (2017). Impact of climate change on farms in smallholder farming systems: Yield impacts, economic implications and distributional effects. *Agricultural systems*, 152, 58–66. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.12.006>
- Higa, L., & Chen, W. (2010). Integrated water resources management in Peru. *Procedia environmental sciences*, 2(5), 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.039>
- Hijioka, Y., Matsuoka, Y., Nishimoto, H., Masui, T., & Kainuma, M. (2008). Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets. *J Glob Environ Eng*, 13(97–108).
- Honkavaara, E., Saari, H., Kaivosoja, J., Pölönen, I., Hakala, T., Litkey, P., ... Pesonen, L. (2013). Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture. *Remote Sensing*, 5(10), 5006–5039. <https://doi.org/10.3390/rs5105006>
- Hsiao, T. C. (1973). Plant responses to water stress. *Annual review of plant physiology*, 24(1), 519–570. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.002511>
- India Department of Fertilizers. (2016). Diammonium Phosphate (DAP) Production from april 2015 to august 2015. Recuperado de <https://community.data.gov.in/diammonium-phosphate-dap-production-from-april-2015-to-august-2015/>

- Jacobsen, S. E., & Bach, A. P. (1998). The influence of temperature on seed germination rate in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Seed science and technology*, 26, 515–523.
- Jacobsen, Sven Erik. (2003). The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food reviews international*, 19(1–2), 167–177. <https://doi.org/10.1081/FRI-120018883>
- Klare, M. (2008). *Planeto sediento, recursos menguantes. La nueva geopolítica de la energía.*
- Ku, P. (2017). Perú como primer exportador de quinua a nivel mundial. *Quipukamayoc*, 25(47), 75–83. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15381/quipu.v25i47.13805>
- Lara, M. V., & Andreo, C. S. (2011). C4 Plants Adaptation to High Levels of CO2 and to Drought Environments. En A. Shanker (Ed.), *Abiotic stress in plants - mechanisms and adaptations* (p. 428). InTech. Recuperado de <http://www.intechopen.com/books/abiotic-stress-in-plants-mechanisms-and-adaptations/c4-plants-adaptation-to-high-levels-of-co2-and-to-drought-environments>
- Liu, F., & Stützel, H. (2004). Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia horticulturae*, 102(1), 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.11.014>
- Minitab 17 Statistical Software (2010). [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc. Descargado de <https://www.minitab.com>
- Montoya, F., Camargo, D., Ortega, J. F., Córcoles, J. I., & Domínguez, A. (2016). Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural water management*, 164(2), 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.019>
- Mujica, A., Jacobsen, S.-E., & Ortiz, R. (1998). *Resistencia a la sequía de la quinua (Chenopodium quinoa Willd.)*. Puno, Perú.
- Mujica, Angel, & Jacobsen, S. (2006). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) y sus parientes silvestres. En M. Moraes, B. Øllgaard, L. Kvist, F. Borchsenius, & H. Balslev (Eds.), *Botánica económica de los andes centrales* (pp. 449–457). La Paz: Universidad Mayor de San Andrés.
- Organización Internacional del Trabajo. (2012). *Análisis de la cadena de valor en el sector de la quinua en Perú.*

- Ostertag, R. (2001). Fine-root dynamics in hawaiian montane forests. *Ecology*, 82(2), 485–499. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0485:EONAPA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0485:EONAPA]2.0.CO;2)
- Pinto, L., & Quipuzco, L. (2015). Aprovechamiento de agua residuales domésticas para producción de biogás mediante digestores de carga diaria. *Anales científicos*, 76(1), 87–93.
- Primicerio, J., Di Gennaro, S. F., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A., & Vaccari, F. P. (2012). A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 13(4), 517–523. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9257-6>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2017). Chapter 2 . Users guide. En *AquaCrop version 6.0 Reference manual* (pp. 2-1,2-302).
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic change*, 109(1–2), 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Rosas Huaranga, G. (2015). *Evaluación agronómica de diez variedad de quinua (Chenopodium quinoa willd.) bajo dos sistemas de cultivo en la unión-leticia, Tarma*. Tesis Ing. Agr. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Sayer, E. J., Joseph Wright, S., Tanner, E. V. J., Yavitt, J. B., Harms, K. E., Powers, J. S., ... Turner, B. L. (2012). Variable responses of lowland tropical forest nutrient status to fertilization and litter manipulation. *Ecosystems*, 15(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9516-9>
- Sinclair, T. R., & Park, W. I. (1993). Inadequacy of the Liebig limiting-factor paradigm for explaining varying crop yields. *Agronomy journal*, 85, 742–746.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Riego y drenaje*. <https://doi.org/978-92-5-308564-4>
- Stern, N. (2008). The economics of climate change. *American economic review*, 98(8), 1–37. <https://doi.org/10.1257/aer.98.2>
- Tai, A. P., Martin, M. V., & Heald, C. L. (2014). Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution. *National climate change* 4, 4(9), 817–821.
- Tapia, M., Gandarillas, H., Alandia, S., Cardozo, A., Mujica, A., Ortiz, R., ... Zanabria, E.

- (1979). *La Quinoa y la Kañiwa*. Bogotá: Editorial IICA.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., ... Edmonds, J. A. (2011). RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109(1–2), 77–94. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4c>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). Manual de nutrición y fertilización de la Quinoa. *Journal of chemical information and modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M. G. J., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., ... van Ruijven, B. (2011). RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic change*, 109(1–2), 95–116. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0152-3>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., ... Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental modelling and software*, 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Vega-Galvez, A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.), an ancient Andean grain: a review. *Journal of the science of food and agriculture*, 90(15), 2541–2547.
- von Caemmerer, S., & Evans, J. R. (2010). Enhancing C3 Photosynthesis. *Plant Physiology*, 154(2), 589 LP – 592. <https://doi.org/10.1104/pp.110.160952>
- Welch, R. (2002). The impact of mineral nutrients in food crops on global human health. En *Progress in plant nutrition: plenary lectures of the XIV international plant nutrition colloquium* (pp. 83–90). Springer Netherlands.
- Wheeler, T., & Braun, J. V. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, 341(6145), 508–519.
- Wolf, D. (2010). *Superfoods: the food and medicine of the future*. North Atlantic Books.
- Wright, S. J., Yavitt, J. B., Wurzbarger, N., Turner, B. L., Tanner, E. V. J., Sayer, E. J., ... Corre, M. . (2011). Potassium, phosphorus, or nitrogen limit root allocation, tree growth, or litter production in a lowland tropical forest. *Ecology*, 98(8), 1616–1625.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

Modelo lineal general: rendimiento vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para RENDIMIENTO kg Grano ha, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	9799315	9799315	1224914	0.98	0.473
FERTILIZANTE	3	30757901	30757901	10252634	8.23	0.001
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	29914503	29914503	1246438	2.63	0.001
VARIEDAD	2	8860902	8860902	4430451	9.37	0.000
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	3279567	3279567	546594	1.16	0.341
Error	64	30275453	30275453	473054		
Total	107	112887640				

S = 687.789 R-cuad. = 73.18% R-cuad.(ajustado) = 55.16%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VII	36	1846.4	A
VIII	36	1367.6	B
VI	36	1162.8	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

FERTILIZANTE	N	Media	Agrupación
FII	27	2276.6	A
FIV	27	1557.6	B
FIII	27	1144.2	BC
FI	27	857.4	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 2

Modelo lineal general: rendimiento grano seco vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Rendimiento kg Grano seco ha, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	7937445	7937445	992181	0.98	0.473
FERTILIZANTE	3	24913900	24913900	8304633	8.23	0.001
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	24230747	24230747	1009614	2.63	0.001
VARIEDAD	2	7177330	7177330	3588665	9.37	0.000
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	2656449	2656449	442741	1.16	0.341
Error	64	24523117	24523117	383174		
Total	107	91438988				

S = 619.010 R-cuad. = 73.18% R-cuad.(ajustado) = 55.16%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VII	36	1661.8	A
VIII	36	1230.8	B
VI	36	1046.6	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

FERTILIZANTE	N	Media	Agrupación
FII	27	2048.9	A
FIV	27	1401.8	B
FIII	27	1029.8	BC
FI	27	771.7	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 3

Modelo lineal general: biomasa seca cosecha vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Biomasa seca Tn/ha Cosecha, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	65.794	65.794	8.224	1.09	0.405
FERTILIZANTE	3	65.806	65.806	21.935	2.90	0.056
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	181.439	181.439	7.560	1.65	0.058
VARIEDAD	2	107.548	107.548	53.774	11.72	0.000
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	27.076	27.076	4.513	0.98	0.444
Error	64	293.684	293.684	4.589		
Total	107	741.348				

S = 2.14215 R-cuad. = 60.39% R-cuad.(ajustado) = 33.77%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VII	36	5.9	A
VI	36	4.3	B
VIII	36	3.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

FERTILIZANTE	N	Media	Agrupación
FII	27	5.88	A
FIV	27	4.39	B
FIII	27	4.29	B
FI	27	3.78	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 4

Modelo lineal general: índice de cosecha vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Índice de Cosecha / HI, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	1914.9	1914.9	239.4	0.74	0.655
FERTILIZANTE	3	8479.2	8479.2	2826.4	8.75	0.000
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	7748.9	7748.9	322.9	1.28	0.212
VARIEDAD	2	3487.9	3487.9	1743.9	6.94	0.002
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	145.4	145.4	24.2	0.10	0.997
Error	64	16081.2	16081.2	251.3		
Total	107	37857.4				

S = 15.8514 R-cuad. = 57.52% R-cuad.(ajustado) = 28.98%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VIII	36	39.0	A
VII	36	32.5	A B
VI	36	25.1	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

FERTILIZANTE	N	Media	Agrupación
FII	27	44.1	A
FIV	27	36.4	A B
FIII	27	28.1	BC
FI	27	20.3	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 5

Modelo lineal general: biomasa kg/h 28/04 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para BioMass kg/ha 28/04, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	140539146	140539146	17567393	2.31	0.053
FERTILIZANTE	3	78432665	78432665	26144222	3.44	0.033
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	182166839	182166839	7590285	1.18	0.294
VARIEDAD	2	27749637	27749637	13874818	2.16	0.124
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	11761988	11761988	1960331	0.30	0.932
Error	64	411804919	411804919	6434452		
Total	107	852455195				

S = 2536.62 R-cuad. = 51.69% R-cuad.(ajustado) = 19.23%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VII	36	5801.3	A
VI	36	5129.2	A
VIII	36	4561.1	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

FERTILIZANTE	N	Media	Agrupación
FII	27	5.88	A
FI	27	5111.8	A B
FIV	27	4944.9	A B
FIII	27	4112.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 6

Modelo lineal general: biomasa kg/h 27/05 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para BioMass kg/ha 27/05, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	648633121	648633121	81079140	2.21	0.063
FERTILIZANTE	3	419561867	419561867	139853956	3.82	0.023
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	879788317	879788317	36657847	0.91	0.588
VARIEDAD	2	370591880	370591880	185295940	4.60	0.014
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	495135471	495135471	82522578	2.05	0.072
Error	64	2576624975	2576624975	40259765		
Total	107	5390335632				

S = 6345.06 R-cuad. = 52.20% R-cuad.(ajustado) = 20.08%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VII	36	11486.3	A
VI	36	8264.1	A B
VIII	36	7108.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

FERTILIZANTE	N	Media	Agrupación
FII	27	11900.7	A
FI	27	9583.3	A B
FIV	27	7325.5	B
FIII	27	7002.5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 7

Modelo lineal general: cobertura vegetal 17/01 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Cobertura Vegetal 17/01, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	332.868	332.868	41.609	1.37	0.257
FERTILIZANTE	3	87.698	87.698	29.233	0.97	0.425
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	726.432	726.432	30.268	5.16	0.000
VARIEDAD	2	175.753	175.753	87.876	14.98	0.000
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	28.747	28.747	4.791	0.82	0.561
Error	64	375.373	375.373	5.865		
Total	107	1726.870				

S = 2.42182 R-cuad. = 78.26% R-cuad.(ajustado) = 63.66%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VII	36	11.3	A
VI	36	10.7	A
VIII	36	8.4	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 8

Modelo lineal general: cobertura vegetal 18/02 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Cobertura Vegetal 18/02, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	2593.11	2593.11	324.14	1.63	0.169
FERTILIZANTE	3	43.98	43.98	14.66	0.07	0.974
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	4780.49	4780.49	199.19	5.31	0.000
VARIEDAD	2	1417.82	1417.82	708.91	18.91	0.000
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	234.48	234.48	39.08	1.04	0.407
Error	64	2399.60	2399.60	37.49		
Total	107	11469.48				

S = 6.12322 R-cuad. = 79.08% R-cuad.(ajustado) = 65.02%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VII	36	35.9	A
VI	36	33.7	A
VIII	36	27.3	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 9

Modelo lineal general: cobertura vegetal 25/03 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Cobertura Vegetal 25/03, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	7700.14	7700.14	962.52	2.80	0.024
FERTILIZANTE	3	1122.56	1122.56	374.19	1.09	0.373
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	8260.77	8260.77	344.20	5.93	0.000
VARIEDAD	2	1405.03	1405.03	702.51	12.10	0.000
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	465.59	465.59	77.60	1.34	0.254
Error	64	3714.55	3714.55	58.04		
Total	107	22668.64				

S = 7.61839 R-cuad. = 83.61% R-cuad.(ajustado) = 72.60%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VII	36	61.0	A
VI	36	60.6	A
VIII	36	53.1	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 10

Modelo lineal general: cobertura vegetal 29/04 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Cobertura Vegetal 29/04, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	1509.3	1509.3	188.7	1.42	0.240
FERTILIZANTE	3	455.5	455.5	151.8	1.14	0.353
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	3193.7	3193.7	133.1	1.20	0.275
VARIEDAD	2	1006.1	1006.1	503.1	4.54	0.014
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	716.5	716.5	119.4	1.08	0.385
Error	64	7084.6	7084.6	110.7		
Total	107	13965.8				

S = 10.5213 R-cuad. = 49.27% R-cuad.(ajustado) = 15.19%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VIII	36	70.7	A
VII	36	66.6	A B
VI	36	63.2	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 11

Modelo lineal general: profundidad radicular 01/03 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Prof Rad 01/03, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	686.086	686.086	85.761	29.90	0.000
FERTILIZANTE	3	14.831	14.831	4.944	1.72	0.189
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	68.843	68.843	2.868	0.73	0.805
VARIEDAD	2	10.159	10.159	5.080	1.29	0.283
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	31.972	31.972	5.329	1.35	0.248
Error	64	252.455	252.455	3.945		
Total	107	1064.345				

S = 1.98610 R-cuad. = 76.28% R-cuad. (ajustado) = 60.34%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VI	36	11.5	A
VII	36	11.0	A
VIII	36	10.7	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 12

Modelo lineal general: profundidad radicular 28/04 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Prof Rad 28/04, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	334.887	334.887	41.861	4.11	0.003
FERTILIZANTE	3	28.772	28.772	9.591	0.94	0.436
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	244.468	244.468	10.186	1.53	0.091
VARIEDAD	2	0.770	0.770	0.385	0.06	0.944
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	37.821	37.821	6.303	0.95	0.468
Error	64	426.121	426.121	6.658		
Total	107	1072.838				

S = 2.58034 R-cuad. = 60.28% R-cuad.(ajustado) = 33.59%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VII	36	14.8	A
VI	36	14.7	A
VIII	36	14.6	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 13

Modelo lineal general: profundidad radicular 27/05 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Prof Rad 27/05, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	8	572.780	572.780	71.597	8.81	0.000
FERTILIZANTE	3	19.067	19.067	6.356	0.78	0.516
BLOQUE*FERTILIZANTE	24	195.129	195.129	8.130	0.87	0.638
VARIEDAD	2	32.222	32.222	16.111	1.72	0.186
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	39.599	39.599	6.600	0.71	0.645
Error	64	597.855	597.855	9.341		
Total	107	1456.653				

S = 3.05639 R-cuad. = 58.96% R-cuad.(ajustado) = 31.38%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VI	36	19.1	A
VIII	36	18.4	A
VII	36	17.8	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 14

Modelo lineal general: biomasa kg/h 25/03 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	6	1, 2, 3, 4, 5, 6
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para BioMass kg/ha 25/03, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	5	22421332	22421332	4484266	1.05	0.424
FERTILIZANTE	3	13221117	13221117	4407039	1.03	0.406
BLOQUE*FERTILIZANTE	15	63902598	63902598	4260173	1.70	0.090
VARIEDAD	2	2542572	2542572	1271286	0.51	0.605
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	3588128	3588128	598021	0.24	0.961
Error	40	100044629	100044629	2501116		
Total	71	205720376				

S = 1581.49 R-cuad. = 51.37% R-cuad.(ajustado) = 13.68%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VI	24	2955.6	A
VII	24	2772.4	A
VIII	24	2498.3	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 15

Modelo lineal general: profundidad radicular 25/03 vs. bloque, fertilizante, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BLOQUE	aleatorio	6	1, 2, 3, 4, 5, 6
FERTILIZANTE	fijo	4	FI, FII, FIII, FIV
VARIEDAD	fijo	3	VI, VII, VIII

Análisis de varianza para Prof Rad 25/03, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
BLOQUE	5	73.60	73.60	14.72	1.39	0.283
FERTILIZANTE	3	4.91	4.91	1.64	0.15	0.925
BLOQUE*FERTILIZANTE	15	158.89	158.89	10.59	1.00	0.475
VARIEDAD	2	4.53	4.53	2.26	0.21	0.809
FERTILIZANTE*VARIEDAD	6	58.27	58.27	9.71	0.92	0.494
Error	40	424.22	424.22	10.61		
Total	71	724.41				

S = 3.25661 R-cuad. = 41.44% R-cuad.(ajustado) = 0.00%

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95.0%

VARIEDAD	N	Media	Agrupación
VI	24	13.9	A
VIII	24	13.4	A
VII	24	13.4	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ANEXO 16

Modelo lineal general: rendimiento vs. GCM, RCP, variedad

Factor	Tipo	Niveles	Valores
GCM	fijo	3	1, 2, 3
RCP	fijo	3	1, 2, 3
Variedad	fijo	3	1, 2, 3

Análisis de varianza para Rendimiento, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	CM Ajust.	F	P
GCM	2	2.4743	2.4743	1.2372	7.61	0.001
RCP	2	13.0868	13.0868	6.5434	40.27	0.000
Variedad	2	43.6228	43.6228	21.8114	134.22	0.000
GCM*RCP	4	4.7678	4.7678	1.1920	7.33	0.000
GCM*Variedad	4	0.5869	0.5869	0.1467	0.90	0.469
RCP*Variedad	4	0.5207	0.5207	0.1302	0.80	0.530
GCM*RCP*Variedad	8	0.6513	0.6513	0.0814	0.50	0.850
Error	54	8.7754	8.7754	0.1625		
Total	80	74.4861				

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 99.0%

Variedad	N	Media	Agrupación
1	27	5.2	A
2	27	4.4	B
3	27	3.4	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 99.0%

GCM	N	Media	Agrupación
2	27	4.5	A
3	27	4.4	A B
1	27	4.1	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 99.0%

RCP	N	Media	Agrupación
1	27	4.6	A
2	27	4.6	A
3	27	3.7	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 99.0%

GCM	RCP	N	Media	Agrupación
3	2	9	4.9	A
2	2	9	4.9	A
2	1	9	4.9	A
1	1	9	4.6	A B
3	1	9	4.4	A B C
1	2	9	3.9	B C
1	3	9	3.7	C
2	3	9	3.7	C
3	3	9	3.7	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.