

# Validación Del Modelo Aquacrop Para Diferentes Niveles De Fertilidad En El Cultivo De Quinua En El Altiplano Boliviano\*

## Validation Of The Aquacrop Model For Different Levels Of Fertilization On Quinoa Crop In The Bolivian Highlands\*

Héctor Fajardo<sup>1</sup>, Magali García<sup>1</sup>, Dirk Raes<sup>2</sup>, H. Van Gaelen<sup>2</sup>

Recibido: 15 de marzo 2016

Aceptado: 29 de octubre 2016

### Resumen

Muchos modelos de simulación de cultivos utilizan balances cuantitativos de nutrientes para modelar la respuesta del cultivo a la fertilidad del suelo, esto significa el uso de una gran cantidad de datos que normalmente no está disponible, lo que dificulta su uso. A diferencia, el modelo AquaCrop liberó su módulo de evaluación de fertilidad con un enfoque semi-cuantitativo, en el cual, en lugar de introducir diferentes niveles de nutrientes específicos, se introduce el nivel de fertilidad general de suelo. Expresado en términos del impacto sobre la biomasa del cultivo, la cual es observada en campo u obtenida de estadísticas de producción. El presente estudio aborda la calibración y validación de este modelo, bajo condiciones de un enfoque semi-cuantitativo para simular el cultivo de quinua en el Altiplano Boliviano bajo restricciones integradas de nutrientes y agua. Los algoritmos de respuesta a la fertilidad del modelo fueron evaluados con datos de experimentos en campo, bajo diferentes modelos de gestión agrícola y regiones del altiplano boliviano, considerando varios niveles de fertilidad

---

\* Parte de la información presentada se publicó con anterioridad en: A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the AquaCrop procedure

1 Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. Email: hectorfajardog@gmail.com

2 Department of Earth and Environmental Sciences, University of Leuven, KU Leuven

y condiciones de secano o con riego deficitario. Demostrándose que AquaCrop simula adecuadamente el contenido de humedad del suelo, el desarrollo de la biomasa seca del cultivo y el rendimiento, bajo diferentes niveles de fertilidad para el cultivo de la quinua, así como también el efecto combinado del estrés por fertilidad e hídrico. Este estudio muestra que el enfoque semi-cuantitativo de AquaCrop tiene un comportamiento adecuado para las condiciones de producción de quinua y comprobando que el modelo puede ser aplicado con niveles de certidumbre, luego de calibrarse para simular la producción del cultivo, bajo diferentes niveles de fertilidad en varias condiciones ambientales. Al no requerir información detallada del contenido de nutrientes en el suelo, haciéndolo útil y aplicable para su uso en condiciones locales donde la información de suelos es limitada.

**Palabras clave:** Simulación, AquaCrop, nutrientes del suelo, rendimiento cultivo, quinua.

## Abstract

Many crop models use a nutrient balance for modeling crop response to soil fertility, but it means the use of a large amount of data that is not normally available, which discourages their use. To compensate this problem, the AquaCrop crop model released its soil fertility evaluation module with a semi-quantitative approach, instead of introducing different levels of specific nutrients, the overall level of soil fertility is introduced. This is expressed in terms of the expected impact on crop biomass, which is observed in the field or obtained from production statistics. The study describes how it was calibrated and evaluated, the semi-quantitative approach of AquaCrop to simulate the quinoa crop in the Bolivian highlands under integrated restrictions of nutrients and water. The response algorithms to fertility in the model were evaluated with data from field experiments crop in different agricultural managements and regions of the Bolivian highlands, with various levels of soil fertility and under rainfed or deficit irrigation. It was demonstrated that AquaCrop properly simulates the soil moisture content, the development of dry biomass and crop yield under different levels of fertility for quinoa as well as the combined effect of fertility stress and water stress. This study shows that the semi-quantitative approach that AquaCrop has, model appropriate the behavior for quinoa production conditions and that the model can be applied with certainty levels after calibrated to simulate crop production under different fertility levels in various environmental conditions without requiring detailed information of content of nutrients in the soil, making it useful and applicable for use; in local conditions where soil information is limited.

**Keywords:** Modeling, AquaCrop, soil fertility, quinoa.

## 1. Introducción

La quinua se constituye en un cultivo estratégico para contribuir a la seguridad y soberanía alimentaria debido a su calidad nutritiva, su amplia variabilidad genética y su adaptabilidad <sup>[1]</sup>. La importancia de la quinua se

debe a sus excelentes cualidades agronómicas y nutricionales. En cuanto a la agronomía, su tolerancia a las heladas, la sequía y la salinidad hacen que esta especie sea la más adecuada para el cultivo en el Altiplano boliviano. Sus cualidades nutritivas, en particular su contenido en proteínas, lo convierten en un producto muy importante para la nutrición y la seguridad alimentaria, sobre todo para las poblaciones de la región andina <sup>[2]</sup>.

La generación de nuevos datos a través de métodos de investigación agronómicos tradicionales y su publicación no son suficientes para satisfacer las necesidades crecientes de información para la producción. Los experimentos tradicionales agronómicos son llevados a cabo en determinados puntos en el tiempo y en el espacio, provocando que los resultados sean específicos para ese sitio y época, consumiendo tiempo y recursos económicos <sup>[3]</sup>. Los agricultores tienen que hacer evaluaciones, con el fin de planificar y gestionar sus parcelas de manera eficiente. Las decisiones estratégicas y tácticas tales como; cuándo plantar, regar, cómo y cuándo fertilizar y cuándo cosechar, son frecuentemente tomadas en base a supuestos empíricos, en base a los años de experiencia del agricultor, y al asesoramiento de consultores agrícolas. Este desafío se vuelve cada vez más difícil de manejar, en un contexto donde las operaciones agrícolas aumentan en tamaño y complejidad <sup>[4]</sup>.

Un modelo de crecimiento de cultivos podría ser utilizado como una ayuda en la toma de decisiones para determinar diferentes tasas de rendimiento en función de factores tales como; la variación de las poblaciones de plantas, tasas de aplicación de nitrógeno entre otros factores, lo que podría ayudar a un agricultor a decidir cuándo plantar, replantar las áreas dentro de un campo, cómo gestionar la tasa de aplicación de nitrógeno, todo esto basado en datos de población de la planta y los factores de riesgo para diferentes tipos de suelos <sup>[5]</sup>. Actualmente, las computadoras personales son ampliamente disponibles, existe un esfuerzo entre los investigadores en agricultura de proveer herramientas basadas en computación para ayudar a los productores y técnicos a manejar y sintetizar información. La principal razón para usar herramientas informáticas como el caso de modelos computacionales en granjas, es incrementar el beneficio y optimizar el manejo de los recursos, además de profundizar en el conocimiento sobre la respuesta de los cultivos a los factores ambientales, ayudando a cumplir con las regulaciones gubernamentales y criterios medioambientales de cultivo <sup>[6]</sup>.

AquaCrop constituye una alternativa de utilidad para modelar los efectos del cambio climático, no olvidando que, como todo modelo, simplifica la realidad y por tanto presenta algunas limitaciones. El modelo permite plantear soluciones anticipadas factibles (riego deficitario, fertilización, manejo de variedades precoces, etc.) mostrando que los agricultores pueden estar preparados ante los factores adversos o en algunos casos sacar ventaja de las condiciones futuras <sup>[7]</sup>. El modelo AquaCrop fue calibrado para quinua, demostrando ser un modelo robusto. La robustez del modelo recae en un buen balance entre los datos introducidos y la precisión de los resultados. La modelación de la productividad del agua para el cultivo permite un estudio completo de riego deficitario en condiciones de limitaciones de agua para diferentes condiciones ambientales. Por otra parte, el efecto de agotamiento de nutrientes en el desarrollo y la producción de la quinua necesita ser modelado con más detalle <sup>[8]</sup>.

En la presente investigación se analizó el desempeño del modelo AquaCrop para simular diferentes niveles de fertilización bajo varios regímenes hídricos en el cultivo de quinua con fines de calibración y validación para su uso generalizado en el Altiplano Boliviano. Para ello se evaluó los resultados de simulación para los rendimientos de quinua bajo el modelo, todo esto con información recolectada que refleja diferentes niveles de fertilización y riego. Al mismo tiempo se analizó las demandas estructurales del modelo para la calibración de diferentes niveles de fertilidad. Aceptando la capacidad del modelo AquaCrop para simular los rendimientos del cultivo de quinua en otras zonas en el Altiplano Boliviano bajo diferentes niveles de fertilidad y riego.

## **2. Materiales y métodos**

El estudio se realizó en el Altiplano Boliviano, considerando cuatro sectores, las cuales cuentan con información referente a la producción de quinua (biomasa y rendimientos). Para ello se consideró e incluyó información generada en experimentos previos que integraron la influencia de la fertilización y el riego, en quinua. La información provino de:

- a) Experimento realizado en Patacamaya en la gestión 2009 – 2010 <sup>[9]</sup>.
- b) Experimento realizado en Viacha en la gestión 1993 – 1994 <sup>[10]</sup>.
- c) Experimento realizado en Santiago de Callapa en la gestión 2009 – 2010 <sup>[11]</sup>.

En la tabla 1 se puede observar el detalle de las zonas de estudio, y las gestiones (número de campañas agrícolas) que fueron utilizadas en el trabajo.

**TABLA 1.** UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS LOCALIDADES EN ESTUDIO Y DATOS EXPERIMENTALES

Lugar de estudio	Viacha	Patacamaya	Santiago de Callapa	Río Mulatos
Departamento	La Paz	La Paz	La Paz	Potosí
Provincia	Ingavi	Aroma	Pacajes	Antonio Quijarro
Coordenadas	17°38' S, 67°40' O	17°14' S, 67°55' O	17°29' S, 68°21' O	19°42' S, 66°47' O
Altitud (m.s.n.m.)	3750	3789	3790	3821
Temperatura media anual (°C)	8.3	9.7	7,6	6.5
Precipitación anual (mm)	565	399	423	180
Eco región	Puna húmeda	Puna semihúmeda	Puna semihúmeda	Puna desértica
Textura del suelo	Franco arcillo limoso	Franco arcilloso	Franco arenoso	Areno francoso
<b>Datos experimentales</b>				
Años	1993-1994	2009-2010 2004-2014	2009-2010	2000-2010
Número de campañas	1	11	1	10
Estrés hídrico	S, RD	S, RD	S	S, RD
Estrés por fertilidad Información utilizada para:	To, T30 Validación	To, T15, T30 Calibración y Evaluación de diferencias de rendimiento.	To, T15, T30 Validación	To, T10, T30 Evaluación de diferencias de rendimiento.

Donde S y RD significan Secano y Riego Deficitario, como los niveles de estrés hídrico. Para el caso del estrés por fertilidad To, T15 y T30 muestran la aplicación de estiércol de 0, 15 y 30 Mg ha<sup>-1</sup> [9],[10],[11].

## 2.1. Procesamiento de datos

En lugar de usar un balance de nutrientes, AquaCrop usa una apreciación cualitativa para determinar el nivel de estrés que experimenta un cultivo por

deficiencias nutricionales <sup>[12]</sup>. Esta medida cualitativa corresponde a la máxima biomasa seca relativa sobre el suelo ( $B_{rel}$ ) que puede ser esperada en un campo con estrés por fertilidad comparado con uno libre de condiciones de estrés (Ecuación 1).  $B_{rel}$  varía entre 100% indicando condiciones libres de estrés por fertilidad y 0% correspondiente a condiciones de alto estrés resultando en una pérdida total de la cosecha.

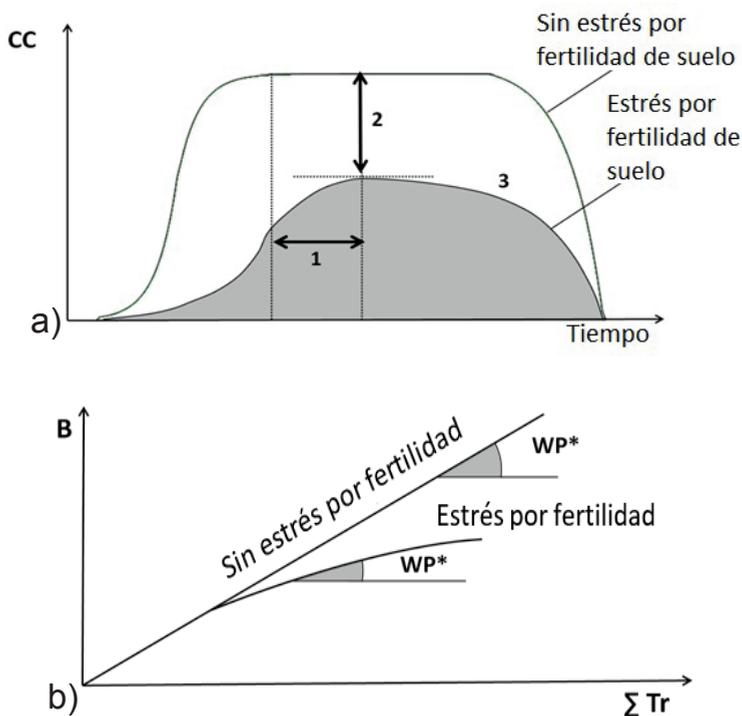
$$B_{rel} = \frac{B_{stress}}{B_{ref}} \cdot 100\% \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $B_{rel}$  es la máxima biomasa aérea seca relativa sobre el suelo (%),  $B_{stress}$  es el total de biomasa sobre el suelo al final de la temporada de crecimiento en un campo con estrés por fertilidad de suelo,  $B_{ref}$  es el total de la biomasa sobre el suelo al final de la temporada de crecimiento en un campo sin estrés por fertilidad de suelo. Tanto  $B_{stress}$  como  $B_{ref}$  tienen que ser observados en campos bien regados (sin estrés hídrico), también libre de otros tipos factores de estrés, como plagas, malezas, enfermedades y salinidad <sup>[12]</sup>.

AquaCrop copia el efecto del estrés por fertilidad de suelos sobre el desarrollo de la cobertura vegetal, de acuerdo a las observaciones en campos con bajos niveles de fertilidad <sup>[13], [14]</sup>. Por esta razón, se implementan tres ajustes: (1) una reducción en el crecimiento de la cobertura y su consecuente desarrollo, (2) reducción en la cobertura máxima y (3) una disminución constante de la cobertura una vez alcanzada la máxima cobertura a mitad de temporada (Figura 1a). Imitar el desarrollo de la cobertura bajo estrés por fertilidad es una característica crucial en el procedimiento cualitativo de AquaCrop, ya que permite una simulación correcta de la transpiración del cultivo y el balance hídrico del suelo. El último componente, productividad del agua, es también ajustado con un valor inferior en presencia de estrés por fertilidad (Figura 1b).

Basados en las observaciones de los experimentos de campo, el efecto del estrés por fertilidad sobre la producción de biomasa diaria es simulada en función de una reducción en la productividad del agua <sup>[14]</sup>. Considerándose que la productividad del agua es la relación entre los beneficios netos de los cultivos y la cantidad de agua utilizada para producir esos beneficios <sup>[15]</sup>.

Como el reservorio de nutrientes del suelo va disminuyendo gradualmente cuando el cultivo se desarrolla, se corrige la productividad del agua, que aumenta gradualmente (WP se reduce en gran medida) cuando más biomasa se produce. Esta corrección a productividad del agua es el resultado de trabajos experimentales con quinua en el altiplano boliviano, ya que AquaCrop se ajusta más a la realidad si la productividad del agua es reducida después de que se produce una cierta cantidad de biomasa y los nutrientes llegan a ser limitados [8].



**FIGURA 1.** A) DESARROLLO DE LA COBERTURA VEGETAL (CC) A LO LARGO DEL TIEMPO (MADURACIÓN DEL CULTIVO) CONTRASTANDO EL EFECTO DEL ESTRÉS POR FERTILIDAD, ESTÉ SE MANIFIESTA POR MEDIO DE (1) UN LENTO DESARROLLO DE LA COBERTURA (2) UNA COBERTURA MENOS DENSA Y (3) DISMINUCIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL EN TEMPORADA DE CRECIMIENTO. B) EL ESTRÉS POR FERTILIDAD DEL SUELO REDUCE LA PRODUCTIVIDAD DEL AGUA (WP\*) DURANTE LA TEMPORADA CUANDO SE PRODUCE MÁS BIOMASA (B) Y EL RESERVORIO DE NUTRIENTES DEL SUELO QUEDA EMPOBRECIDO. EL EJE DE ABCISAS REPRESENTA LA SUMATORIA DE LA TRANSPIRACIÓN DIARIA (Tr), ASÍ MISMO ESTE PUEDE SER ASIMILADO COMO UNA FUNCIÓN DEL TIEMPO.

## 2.2. Calibración del modelo

Para la calibración del modelo y sus variables numéricas, se recolectó información productiva de la campaña 2009 – 2010 con datos de aplicación de fertilizantes generados por Miranda, et al. (2012) <sup>[9]</sup> en Patacamaya, de acuerdo a las dosis presentadas en la Tabla 2. Tomando en cuenta que los parámetros de ajuste fueron la biomasa y rendimiento del cultivo.

**TABLA 2.** ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA LA COMUNIDAD DE PATACAMAYA EN LA GESTIÓN 2009–2010

Fecha de siembra	20 de octubre de 2009
Tratamientos de Fertilización	0 Mg ha <sup>-1</sup> de estiércol 15 Mg ha <sup>-1</sup> de estiércol 30 Mg ha <sup>-1</sup> de estiércol
Tratamientos de Riego	Sin riego Riego deficitario (100,6 mm)

## 2.3. Análisis estadístico y validación de resultados

La evaluación del desempeño de los modelos es importante para proporcionar una estimación cuantitativa de la capacidad del modelo para reproducir una variable observada, y así evaluar el impacto de la calibración de los parámetros del modelo, comparando los resultados del modelo con las variables observadas <sup>[16]</sup>. Varios indicadores estadísticos están disponibles para evaluar el desempeño de un modelo, entre los que se encuentran el error máximo, la raíz del cuadrado medio del error, coeficiente de determinación, eficiencia de modelo entre otros <sup>[17]</sup>. Cada uno tiene sus propias fortalezas y debilidades; cuantificación de la dispersión de los datos, la sensibilidad a los valores extremos o la percepción a la sobre estimación o sub estimación; lo que significa que es necesario el uso de un conjunto de diferentes indicadores para evaluar suficientemente el rendimiento del modelo <sup>[18],[19]</sup>.

Para la validación de la calibración realizada con los pasos descritos previamente, se evaluó el desempeño del software calibrado con datos de las campañas 1993 – 1994 de la comunidad de Viacha y 2009 – 2010 de Santiago de Callapa.

En el caso de la comunidad de Viacha, para la campaña 1993 – 1994, se consideró diferentes niveles de fertilización tanto bajo riego como a secano. La evaluación del desempeño del modelo se realizó en base a los datos del rendimiento del cultivo. Se utilizó la información generada por Murillo (1995) [10] en experimentos realizados en la gestión 1993 – 1994 en Viacha de cuyo trabajo se obtuvo la información necesaria de los tratamientos aplicados, tal como se presenta en la Tabla 3.

**TABLA 3.** DATOS DE ENTRADA PARA EL TRABAJO DE VALIDACIÓN DE LA COMUNIDAD DE VIACHA EN LA GESTIÓN 1993 - 1994

Fecha de siembra	1 de octubre de 1993
Tratamientos de Fertilización	0 80 – 0 – 0 Urea (46%)
Tratamientos de Riego	Sin riego Riego (152,27 mm)

En la comunidad de Santiago de Callapa en la campaña 2009 – 2010, Mamani (2011) [11] midió diferentes niveles de fertilidad en condiciones a secano. En este caso se tomaron en cuenta tres variables para la validación. Las que fueron: el rendimiento del cultivo, la biomasa final del cultivo y el contenido de humedad en el suelo. Los escenarios bajo los cuales se desarrolló el cultivo se muestran en la tabla 4.

**TABLA 4.** ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PARA LA COMUNIDAD DE SANTIAGO DE CALLAPA EN LA GESTIÓN 2009 – 2010

Fecha de siembra	31 de octubre de 2009
Tratamientos de Fertilización	0 Mg ha-1 de estiércol 15 Mg ha-1 de estiércol 30 Mg ha-1 de estiércol

Estas variables fueron sometidas a las siguientes pruebas estadísticas, coeficiente de determinación ( $r^2$ ), raíz del cuadrado medio del error (RMSE), coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF) y el índice de concordancia de Willmott (d). El análisis estadístico se realizó considerando los resultados obtenidos en las pruebas de campo y en los datos conseguidos por medio del modelo, equiparando las variables ya mencionadas.

## 2.4. Evaluación de diferenciales de rendimiento

Se evaluó las diferenciales en rendimiento que podrían haberse esperado en puntos seleccionados del altiplano (Patacamaya y Río Mulatos) con el fin de evaluar la factibilidad del uso integrado de nutrientes y riego deficitario en el cultivo de quinua. Para este fin se simularon 10 años en los puntos de Patacamaya y de Río Mulatos para verificar la diferencia que existe entre la producción (rendimiento en toneladas por hectárea) con un nivel óptimo de fertilización o sin estrés por fertilidad y uno con deficiencias nutricionales o bajo estrés. Así también se realizaron simulaciones con un nivel adecuado de fertilización y la aplicación de riego deficitario, para demostrar la relación que existe entre ambos factores y su efecto combinado sobre el rendimiento del cultivo.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Calibración

Los requerimientos del modelo AquaCrop para la calibración del estrés por fertilidad para el cultivo de quinua son: (1) la biomasa relativa (En base a la ecuación 1); (2) máxima cobertura vegetal; (3) decaimiento de la cobertura y (4) efecto sobre la productividad del agua. Se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran a continuación en la tabla 5:

**TABLA 5.** DATOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL EFECTO DE LA FERTILIDAD EN EL MODELO AQUACROP PARA EL CULTIVO DE QUINUA

Parámetro	Datos de calibración
Biomasa relativa	50%
Máxima cobertura vegetal	44%
Decaimiento de la cobertura	Medio
Efecto sobre la productividad del agua	33%

El ajuste entre los datos se realizó por medio de una análisis gráfico, entre la información observada versus la simulada, adicionalmente fue sometida al análisis estadístico.

La producción de biomasa es una relación porcentual de la cantidad de biomasa que se produce bajo un nivel de estrés por fertilidad. A partir de la ecuación 1, es que se establece la relación entre el nivel de estrés por fertilidad y el porcentaje de biomasa producido. Para una mayor comprensión de los valores de fertilización, se realizó una conversión de la cantidad de nitrógeno disponible aportado de acuerdo con la cantidad de estiércol aplicado, considerando una humedad del estiércol del 38,72%, un porcentaje de nitrógeno total de 0,95% y una tasa de mineralización del 25% [9]. En la tabla 6 se muestra la relación existente entre la dosis de fertilización y la producción de biomasa del cultivo.

**TABLA 6.** PRODUCCIÓN DE BIOMASA ASOCIADA AL NIVEL DE FERTILIZACIÓN APLICADO

Producción de biomasa (%)	Estiércol ovino (Mg ha <sup>-1</sup> )	Nitrógeno disponible (Kg ha <sup>-1</sup> )
100	30 (T30)	43,66
89	15 (T15)	21,83
23	0 (To)	0

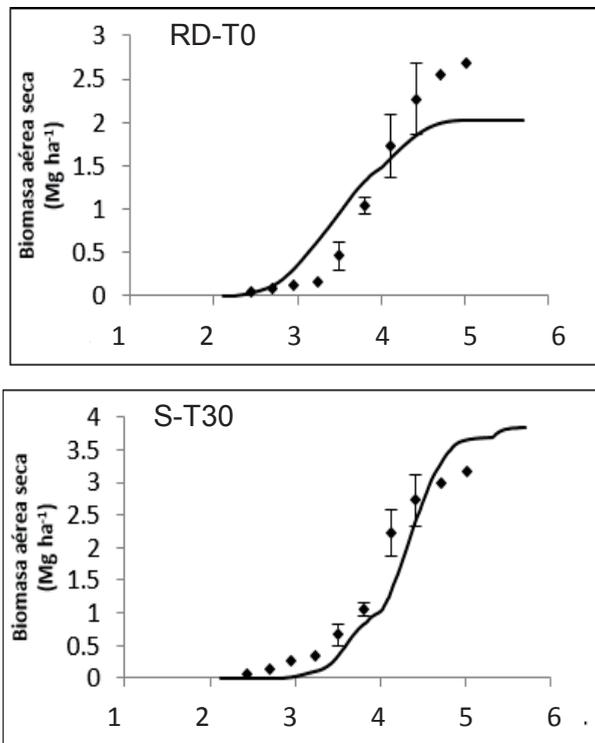
Con el modelo y sus coeficientes ya generados satisfactoriamente se simularon los diferentes escenarios presentados en la gestión 2009 – 2010 en la comunidad de Patacamaya, considerándose la interacción entre el estrés hídrico y el estrés por fertilidad. En la tabla 7 se observa la eficacia del modelo para simular diferentes escenarios de estrés de fertilidad e hídrico. Los rendimientos simulados tanto en secano como bajo riego deficitario, presentan una muy buena correlación con los datos reales, siendo que el modelo captura la poca utilidad de incrementar niveles de fertilización si no se provee de la cantidad adecuada de riego al cultivo, incluso contando con riego deficitario.

**TABLA 7.** COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES OBTENIDOS EN CAMPO Y LOS SIMULADOS

Riego	Fertilización Mg ha <sup>-1</sup>	Rend. Real Mg ha <sup>-1</sup>		Rend. Simulado. Mg ha <sup>-1</sup>
		Media	Desv. Est.	
RD	To	0,50	0,208	0,62
RD	T15	1,57	0,677	1,37
RD	T30	1,42	0,404	1,38
S	To	0,49	0,178	0,52
S	T15	1,26	0,797	1,05
S	T30	1,15	0,672	1,11

### Desarrollo de la biomasa del cultivo

Se comparó el desarrollo de la biomasa del cultivo, a lo largo de toda la campaña. La Figura 2 muestra el comportamiento del desarrollo de la biomasa simulada (línea continua) en el tiempo comparando con los datos medidos en campo (puntos). Se distingue que el modelo simula adecuadamente la disminución de la biomasa producida cuando el cultivo se encuentra en diferentes niveles de estrés de fertilidad y de riego en forma combinada. Se aprecia una ligera sobreestimación de la biomasa final en los tratamientos sin fertilización tanto bajo riego como a secano, lo que se debería a que el modelo no cuantifica suficientemente el descenso de la productividad del agua por la baja fertilidad, de igual manera a los que menciona Geerts [8].



**FIGURA 2.** COMPORTAMIENTO DEL DESARROLLO DE LA BIOMASA MODELADA (LÍNEA CONTINUA) CON LOS DATOS OBTENIDOS EN CAMPO.

## Análisis de la humedad de suelo

Adicionalmente se midió la precisión con la que el modelo realizaba el balance de humedad del suelo lo cual ejemplifica la exactitud con la que el modelo puede predecirla. La Figura 3, muestra que la aproximación que hace el modelo sobre el contenido de agua en el suelo, es adecuada, aunque tiende a sobre estimar los contenidos de agua para los tratamientos bajo riego, especialmente los que incluyen fertilización. También se muestra una general sobre estimación cuando los niveles de humedad en el suelo son bajos. Sin embargo, las variaciones son bajas lo cual no afecta sustancialmente a la producción de biomasa ni a los rendimientos.

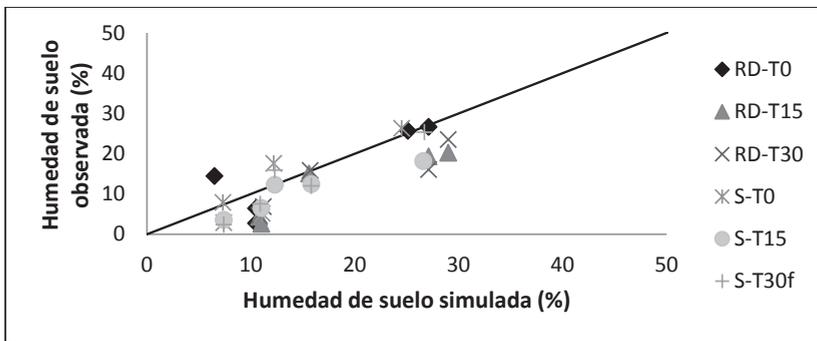


FIGURA 3. CONTRASTE ENTRE LOS VALORES DE HUMEDAD DE SUELO SIMULADOS Y LOS VALORES OBSERVADOS.

## 3.2. Validación

Con el fin de ver y medir la precisión con la que el modelo puede reproducir las variables observadas, se utilizaron los valores obtenidos en la calibración (Tabla 5), y fueron puestos a prueba en diferentes condiciones (diferente lugar y tiempo, considerándose las diferencias de niveles de estrés por fertilidad y estrés hídrico).

En el primer caso tomando en cuenta las condiciones presentadas en la tabla 3, se procedió a simular la productividad del cultivo bajo diferentes escenarios de riego y fertilidad donde se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 8. Para este caso solo se cuenta con los valores de rendimiento. Se puede observar que los valores simulados en tres escenarios

tienen una leve subestimación en comparación con los valores observados, pero éstos no son estadísticamente representativos.

**TABLA 8.** COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS OBSERVADOS Y LOS SIMULADOS DEL RENDIMIENTO PARA LA COMUNIDAD DE VIACHA EN LA GESTIÓN 1993 – 1994

	Fertilización	Riego	Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> )	
			Observado	Simulado
T1	Con fert.	Riego	2,436	2,504
T2	Sin fert.	Riego	1,651	1,611
T3	Con fert.	Secano	2,027	1,918
T4	Sin fert.	Secano	1,379	1,310

Para el segundo caso, con las condiciones mencionadas en la Tabla 4, se compararon las variables rendimiento, biomasa final y humedad de suelo.

Se obtuvieron diferentes rendimientos para cada uno de los niveles de estrés por fertilidad a los que fue sometido el cultivo. Los tratamientos y sus resultados se muestran en la Tabla 9. Bajo esta situación en la que se emplean tres niveles de fertilización se observa que por encima del segundo nivel no se distinguen cambios en los valores simulados, esto dado a que el modelo asume un umbral máximo de fertilización con un máximo de rendimiento. A mayor incremento de la dosis de fertilización el modelo seguirá brindando el valor máximo de rendimiento. La máxima eficiencia técnica para el uso de fertilizante está en 15 Mg ha<sup>-1</sup> de estiércol ovino [20], por encima de este valor la presencia elevada de carbono en el suelo por efecto del estiércol, llega incluso a producir un efecto negativo sobre el rendimiento [21].

**TABLA 9.** COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS OBSERVADOS Y LOS SIMULADOS DEL RENDIMIENTO PARA LA COMUNIDAD DE SANTIAGO DE CALLAPA EN LA GESTIÓN 2009 – 2010

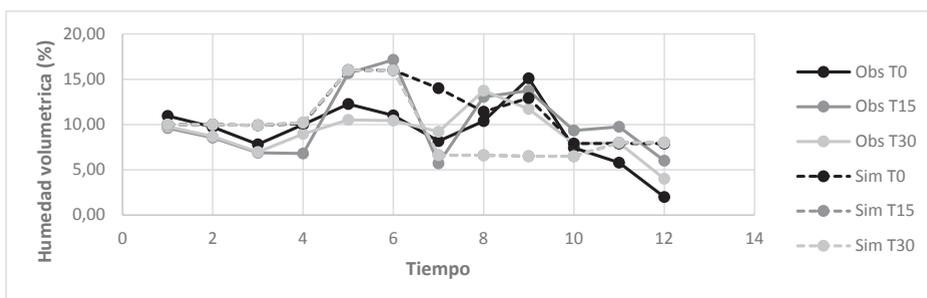
	Fertilización (Mg ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> )	
		Observado	Simulado
T1	0	0,622	0,770
T2	15	1,815	1,810
T3	30	1,302	1,810

Para los diferentes niveles de estrés por fertilidad al que fue sometido el cultivo en Santiago de Callapa, se encontraron diferentes niveles de biomasa final (Biomasa área seca). Estas diferencias en la biomasa final se muestran en la Tabla 10. La variable biomasa final está estrechamente ligada con la de rendimiento, por lo cual presentan el mismo comportamiento.

**TABLA 10.** COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS OBSERVADOS Y LOS SIMULADOS DE LA BIOMASA PARA LA COMUNIDAD DE SANTIAGO DE CALLAPA EN LA GESTIÓN 2009 – 2010

	Fertilización (Mg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa final (Mg ha <sup>-1</sup> )	
		Observado	Simulado
T1	0	1,256	1,801
T2	15	3,633	4,515
T3	30	3,018	4,515

El modelo cuenta con la característica de poder medir la interacción entre el estrés de fertilidad con el estrés hídrico. El modelo calibrado es capaz de simular adecuadamente el contenido de agua en el suelo, en los campos sometidos a estrés de fertilidad y no estresados [22]. En la figura 4 se muestra el contenido volumétrico de agua en el suelo de la zona de la raíz para cada tratamiento observado, así como el simulado. Exhibiendo que el modelo simula adecuadamente la dinámica y variación temporal de la humedad de suelo observada en el experimento realizado en Santiago de Callapa, existiendo pocos puntos en los que la humedad simulada de suelo difiere de la observada.



**FIGURA 4.** CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA EN EL SUELO, PARA CADA TRATAMIENTO. LAS LÍNEAS ENTERAS MUESTRAN LOS DATOS OBSERVADOS Y LAS LÍNEAS PUNTEADAS LOS DATOS SIMULADOS.

## Indicadores estadísticos

A través del análisis estadístico entre los valores simulados y los valores obtenidos en campo, se puede evidenciar la confiabilidad y robustez que presenta el modelo. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 11.

**TABLA 11.** INDICADORES ESTADÍSTICOS PARA LA VALIDACIÓN

Estadísticos	Viacha Rendimiento	Santiago de Callapa Rendimiento	Santiago de Callapa Biomasa	Santiago de Callapa Humedad de suelo
Coefficiente de determinación ( $r^2$ )	0,986	0,817	0,938	0,825
La raíz del cuadrado medio del error (RMSE)	0,577 Mg ha <sup>-1</sup>	0,234 Mg ha <sup>-1</sup>	1,051 Mgha <sup>-1</sup>	2,83 H <sub>vol</sub> %
Normalización (NRMSE)	30,80%	18,77%	39,89%	27,34%
El coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF)	-1,103	0,771	- 0,089	0,013
El índice de concordancia de Willmott (d)	0,793	0,926	0,819	0,803

Estos resultados muestran que el modelo posee una buena capacidad para representar el comportamiento del cultivo y de la humedad de suelo. Con valores confiables como los que se muestran, se sustenta la capacidad del modelo para medir el efecto del estrés por fertilidad e incluso la incursión del estrés hídrico y su interacción.

Similares resultados se obtuvieron para la validación de la biomasa de 18,3% y 15,2% para el valor normalizado de la raíz del cuadrado medio del error y de 0,91 y 0,87 para el coeficiente de determinación  $r^2$  en el caso de riego completo y cultivo a secano respectivamente [12]. Para la dinámica del agua, obteniendo para un tratamiento con riego completo, valores de 3,5% para la raíz del cuadrado medio del error; 0,89 para el índice de concordancia de Willmott y 0,94 para el coeficiente de determinación  $r^2$ . Para el caso de riego de

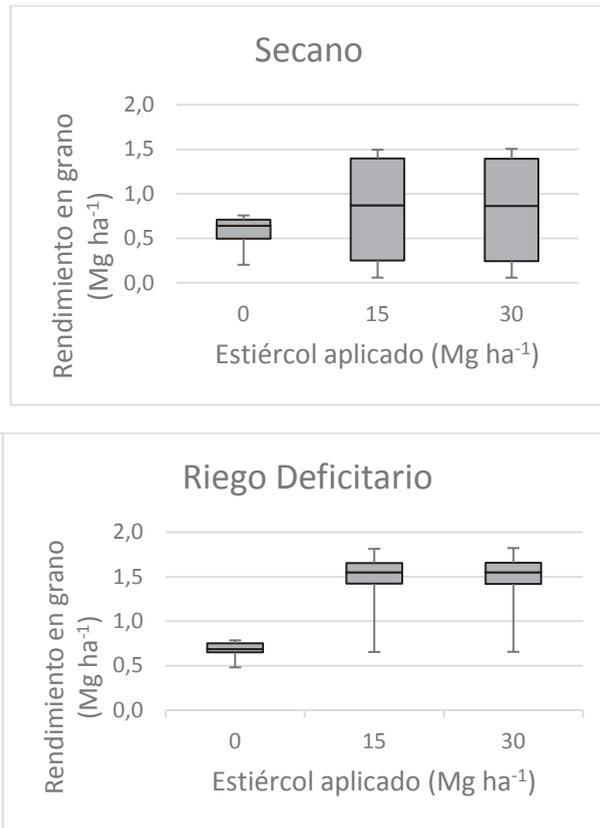
ficitario: 4,2% para la raíz del cuadrado medio del error; 0,92 para el índice de concordancia de Willmott y 0,96 para el coeficiente de determinación  $r^2$ <sup>[23]</sup>.

El procedimiento semi-cuantitativo de la fertilidad del suelo de AquaCrop proporciona resultados realistas; no sólo fueron la biomasa final y el rendimiento simulado que cuentan con una precisión aceptable. También el contenido de agua del suelo y el desarrollo de la biomasa durante el desarrollo del cultivo, se simularon con precisión satisfactoria <sup>[12]</sup>. La validación del modelo AquaCrop ilustra que el modelo fue capaz de simular el contenido de agua del suelo de la zona de la raíz, biomasa y rendimiento del cultivo con precisión en relación a la influencia de la fertilidad de suelo. La simplicidad de AquaCrop, debido a los mínimos datos de entrada requeridos, que son fácilmente disponibles o se pueden recoger con facilidad, hace que sea fácil de usar para potenciales usuarios <sup>[23]</sup>. El modelo calibrado es capaz de simular adecuadamente el contenido de humedad en el suelo, el desarrollo de la cobertura, la biomasa aérea seca y el rendimiento en campos con estrés por fertilidad como en campos sin estrés. El análisis de sensibilidad del AquaCrop muestra la capacidad del modelo para mostrar la interacción entre la planta y el agua <sup>[22]</sup>.

### 3.3. Evaluación de diferenciales de rendimiento

Se distingue un comportamiento similar de los rendimientos en Patacatama y de Río Mulatos. Mostrando un incremento en la producción con el incremento de fertilizante y aplicación de agua. Pero más importante aún es la baja en la variación de los rendimientos, en el caso de los escenarios en los que se aplicó riego deficitario. Es decir que aplicando agua en momentos clave para el cultivo, se tiene una mayor seguridad de obtener el nivel productivo esperado, lo cual demuestra la fuerte interacción entre el agua y los nutrientes disponibles en el suelo. En la situación sin riego, se obtuvo para el primer nivel un rendimiento medio de 0,64 Mg ha<sup>-1</sup> con valores que oscilan entre 0,71 y 0,49 Mg ha<sup>-1</sup>. Para el segundo nivel se observa un incremento del rendimiento a un valor de 0,87 Mg ha<sup>-1</sup> de rendimiento en grano, con un rango entre 1,39 y 0,25 Mg ha<sup>-1</sup> de rendimiento. En el tercer nivel se percibe un muy bajo incremento del rendimiento a un valor de 0,86 Mg ha<sup>-1</sup>, con un rango de 1,39 y 0,25 Mg ha<sup>-1</sup>. Para la situación con riego deficitario, en el primer nivel los rendimientos presentan una media de 0,68 Mg ha<sup>-1</sup> de rendimiento

con valores que oscilan entre 0,75 y 0,65 Mg ha<sup>-1</sup>. En el segundo nivel existe un incremento del rendimiento a un valor de 1,55 Mg ha<sup>-1</sup> de rendimiento en grano, con un rango entre 1,65 y 1,42 Mg ha<sup>-1</sup> de rendimiento. Para el tercer nivel se aprecia un muy bajo incremento del rendimiento a un valor de 1,54 Mg ha<sup>-1</sup>, con un rango de 1,66 y 1,41 Mg ha<sup>-1</sup>.



**FIGURA 5.** RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE QUINUA PARA LA COMUNIDAD DE RÍO MULATOS BAJO DIFERENTES NIVELES DE FERTILIZACIÓN A SECANO. BAJO DIFERENTES NIVELES DE FERTILIZACIÓN CON LA APLICACIÓN DE RIEGO DEFICITARIO.

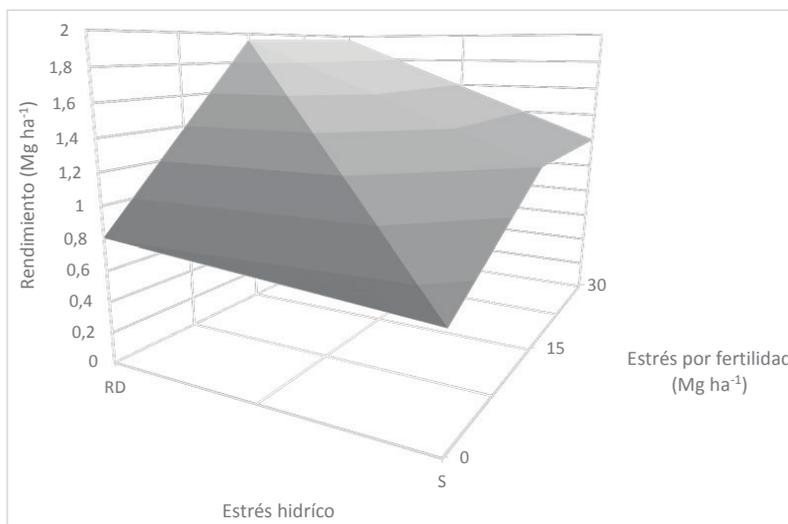
Bajo la aplicación de riego deficitario efectivamente se pudo observar una estabilización en el rendimiento del cultivo. El riego deficitario para el cultivo de la quinua representa una concreta medida de adaptación al cambio climático, debido a que se posibilitaría la estabilización de rendimientos <sup>[24]</sup>.

Además, el riego deficitario es un proceso consistente en suministrar agua adicional para estabilizar el rendimiento [25]. De la misma forma esta práctica adiciona limitadas cantidades de agua a cultivos a secano, con la intención de estabilizar las cosechas [26].

Debido a que en simulaciones para el altiplano central y sur se vio descensos en el rendimiento para un mayor nivel de estrés por fertilidad (la aplicación de 0 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno), demostrando de esta manera que para obtener rendimientos adecuados es necesario por lo menos la aplicación de 15 Mg ha<sup>-1</sup> de estiércol al suelo (22 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno disponible mineralizado bajo estas condiciones).

### Relación entre el estrés por fertilidad y estrés hídrico

El uso eficiente de los nutrientes del suelo posee una estrecha relación con el contenido de agua en el suelo. La interacción entre los niveles de abono y los regímenes de humedad son determinantes en el comportamiento de las distintas variables edafológicas y agronómicas. Obteniendo resultados con una fertilización de 30 Mg ha<sup>-1</sup> produciendo valores de 1,99 y 1,86 Mg ha<sup>-1</sup> de rendimiento, respecto a la aplicación de 0 Mg ha<sup>-1</sup> de abono resultando en 1,11 y 1,24 Mg ha<sup>-1</sup> de grano, bajo el suministro de dos láminas de riego [27].



**FIGURA 6.** EFECTO COMBINADO DEL ESTRÉS POR FERTILIDAD Y EL ESTRÉS HÍDRICO SOBRE EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE QUINUA.

Esto también se aprecia en el desarrollo del cultivo de quinua. En la Figura 6 se puede observar como el rendimiento del cultivo se incrementa con el aumento de la cantidad de fertilizante. Se puede observar que el cultivo de quinua posee un mejor uso de los nutrientes cuando dispone de agua en el suelo. Así mismo el uso eficiente del agua aumenta con el nivel de fertilizante aplicado. Remarcando así la relación entre el estrés por fertilidad y el estrés hídrico. Obteniéndose valores de 0,67; 1,2 y 1,2 Mg ha<sup>-1</sup> en condiciones a secano y de 0,81; 1,96 y 1,97 Mg ha<sup>-1</sup> con el suministro de riego deficitario, para los tres niveles de fertilidad respectivamente.

#### **4. Conclusiones**

AquaCrop simulo con la suficiente robustez el efecto del estrés por fertilidad para el cultivo de quinua, demostró ser lo suficientemente sensible a los cambios en los niveles de nitrógeno útil para el cultivo de quinua.

Se demostró que mediante la utilización de los datos para la calibración del efecto de la fertilidad para el cultivo de quinua al interior del modelo se pudo establecer una correlación que hizo posible ver el efecto directo del estrés por fertilidad en el cultivo de quinua. Haciendo posible simular diferentes escenarios de fertilidad del suelo mediante la introducción de la información requerida por el modelo mediante escenarios controlados.

Los diferentes índices estadísticos utilizados demuestran la confiabilidad para la calibración del modelo para el cultivo de quinua bajo diferentes condiciones de estrés por fertilidad, así como para varios regímenes hídricos. El proceso de calibración es fiable y tiene un alto espectro de confiabilidad.

El modelo de cultivo AquaCrop puede a su vez simular de forma correcta la interaccionan de diversos tipos de estrés, como es el caso del estrés por fertilidad y el estrés hídrico.

Aquacrop puede simular correctamente el comportamiento de la biomasa del cultivo, el rendimiento final esperado todo bajo diferentes condiciones de manejo del cultivo y diferentes escenarios de contenido de humedad en el suelo.

De acuerdo a los resultados encontrados mediante la utilización del modelo se pudo evidenciar que el estrés por fertilidad es una limitante importante de la productividad en cultivos de quinua. Siendo el segundo nivel de

fertilización el más óptimo en uso de nutrientes y agua, con relación al rendimiento del cultivo.

Los resultados obtenidos por Aquacrop muestran que bajo condiciones de riego deficitario los rendimientos se incrementan, tanto en el altiplano central como en el altiplano sur de Bolivia. Existiendo una menor variabilidad en los rendimientos del cultivo con la adición de riego deficitario, esta respuesta ayuda a estabilizar los rendimientos bajo diferentes condiciones climáticas, esto es determinante para los requerimientos de mercado internacional, el cual exige unos parámetros de uniformidad en el producto.

## 5. Referencias

- [1] FAO, Quinoa: An ancient crop to contribute to world food security, 2011.
- [2] W. Rojas, J.L. Soto, E. Carrasco, Study on social, environmental and economic impacts of quinoa promotion in Bolivia, 2004.
- [3] J.W. Jones, The DSSAT cropping system model, 2003.
- [4] D.H. Fleisher, Crop Models - In Open Field, 2009.
- [5] S. Graeff, J. Link, J. Binder, W. Claupein, Crop models as decision support systems in crop production, 2012.
- [6] L. Ahuja, L. Ma, T. Howell, Agricultural system models in field research and technology transfer, 2002.
- [7] C. Saavedra, Modelación de los efectos del cambio climático en tres zonas productoras de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) del altiplano boliviano para identificar opciones de adaptación, La Paz – Bolivia, 2011.
- [8] S. Geerts, Deficit irrigation strategies via crop water productivity modeling: Field research of quinoa in the Bolivian Altiplano, Katholieke Universiteit Leuven, 2008.
- [9] R. Miranda, H. Mendoza, E. Yucra, Abonamiento orgánico y riego suplementario en el cultivo de quinua, Suelos Ecuatoriales, 2012.
- [10] R. Murillo, Comportamiento del nitrógeno proveniente de fertilizantes minerales en el cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) bajo condiciones de riego y secano. La Paz – Bolivia, Universidad Mayor de San Andrés, 1995.
- [11] P. Mamani, Exportación y balance de nitrógeno en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) bajo diferentes niveles de abono en la comunidad de Callapa, La Paz – Bolivia, Universidad Mayor de San Andrés, 2011.
- [12] H. Van Gaelen, A. Tsegay, N. Delbecque, N. Shrestha, M. Garcia, H. Fajardo, R. Miranda, E. Vanuytrecht, B. Abrha, J. Diels, D. Raes, A semi-quantitative approach for mo-

- delling crop response to soil fertility: evaluation of the AquaCrop procedure, Journal of agricultural science, 2014.
- [13] G. Walburg, M.E. Bauer, C.S.T. Daughtry, Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield and reflectance characteristics of corn canopies, Indiana – USA, 1981.
- [14] P. Steduto, R. Albrizio, Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea: Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency, 2005.
- [15] D. Molden, T. Oweis, P. Steduto, P. Bindraban, M. Hanjra, J. Kijne. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. 2009.
- [16] P. Krause, D.P. Boyle, F. Bäse, Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, Advances In Geosciences, 2005.
- [17] K. Loague, R.E. Green, Statistical and graphical methods for evaluating solute transports models: Overview and application, Journal of Contaminant Hydrology, 1991.
- [18] C.J. Willmott, On the evaluation of model performance in physical geography, 1984.
- [19] D.R. Legates, G.J. McCabe, Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, Water Resources Research, 1999.
- [20] R. Miranda, Adução Orgânica Em Condições De Irrigação Suplementar E Seu Efeito Na Produtividade Da Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd) No Planalto Da Bolívia. 2012.
- [21] P. Ramos, C. Márquez, Avances en la calidad ambiental. Salamanca – España. 2002.
- [22] N. Shrestha, Improving cereal production in the Terai region of Nepal. Assessment of field management strategies through a model based approach. 2014.
- [23] M. Bitri, S. Grazhdani, A. Ahmeti, Validation of the aquacrop model for full and deficit irrigated potato production in environmental condition of Korça zone, 2014.
- [24] C. Canedo, Análisis regional de frecuencias y proyección del requerimiento de agua en áreas productoras de quinua (*Chenopodium quinoa* willd.) bajo condiciones de cambio climático en el altiplano de Bolivia, La Paz – Bolivia, Universidad Mayor de San Andrés, 2014.
- [25] FAO, AquaStat, 2013.
- [26] T. Oweis, A. Hachum, Supplemental irrigation. A highly efficient water-use practice, Aleppo – Siria, 2012.
- [27] F. Zuazo, Evaluación de la actividad microbiana y la mineralización de nitrógeno en macetas bajo diferentes niveles de abono orgánico y régimen de humedad en el cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) Viacha - La Paz, La Paz – Bolivia, Universidad Mayor de San Andrés, 2013.